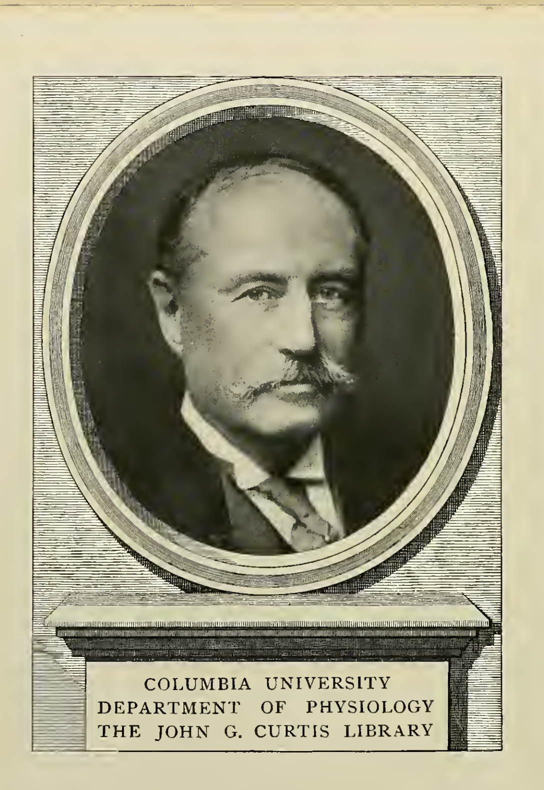



COLUMBIA UNIVERSITY
DEPARTMENT OF PHYSIOLOGY
THE JOHN G. CURTIS LIBRARY







Abhandlungen

zur

Physiologie der Gesichtsempfindungen

aus dem

physiologischen Institut zu Freiburg i. B.

Herausgegeben

von

J. von Kries.

Erstes Heft.

Mit Figuren im Text und einer Farbentafel.

Hamburg und Leipzig.
Verlag von Leopold Voss.
1897.

Sonder-Abdruck

aus:

Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane.

Druck der Verlagsanstalt und Druckerei A.-G. (vormals J. F. Richter) in Hamburg.

Vorwort.

Das folgende Heft enthält eine Anzahl aus der „*Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane*“ abgedruckter Abhandlungen. Die Vereinigung derselben erschien mir nützlich, da ihre innere Zusammengehörigkeit einen leichteren Überblick vielfach wünschenswert machen dürfte, für eine andere (etwa monographische) Form der Zusammenfassung aber der rechte Zeitpunkt jetzt (und wohl noch ziemlich lange) nicht gekommen ist. Die Abhandlungen knüpfen alle an den im Jahre 1894 von mir ausgesprochenen Gedanken an, daſs das normale Sehorgan auſser dem farbentüchtigen einen total farbenblinden, hauptsächlich als Dunkelapparat (d. h. beim Sehen in schwachem Licht) funktionierenden Bestandteil besitzt, daſs somit farblose Helligkeitsempfindung auf zwei wesentlich verschiedene Weisen hervorgerufen werden kann, und daſs der Dunkelapparat anatomisch wahrscheinlich durch die Stäbchen der Netzhaut gegeben ist. Als gemeinsames Ziel der nachstehenden Abhandlungen, sowie einiger weiterer, die ich folgen zu lassen hoffe, möchte ich ausdrücklich nicht das bezeichnen, jene Hypothese zu beweisen; ihre Absicht geht vielmehr dahin, die durch jene Annahme angeregten Fragestellungen zu verfolgen. Da ich allen über die Natur der nervösen Vorgänge bis jetzt entwickelten Hypothesen mit recht groſsem Skepticismus gegenüberstehe, so dürfte kaum Jemand den Wert von thatsächlichen Feststellungen gegenüber irgend welchen theoretischen Konstruktionen höher veranschlagen als ich dies, gerade auch

im Gebiete des Gesichtssinnes thue. Mit Sicherheit aber läſst sich wohl sagen, daſs jener Gedanke durch die Untersuchungen zu denen er anregte (über die Unterschiede verschiedener Erscheinungen im hell- und im dunkeladaptierten Zustande, über die Sonderstellung der Fovea centralis u. a. m.) eine Reihe beachtenswerter Thatsachen kennen gelehrt hat.

Aus diesem Grunde hoffe ich, daſs die hier gebotene Zusammenstellung nicht völlig entwertet werden würde, selbst wenn der ihren Ausgang bildende Grundgedanke sich einmal als unrichtig herausstellen sollte. Mir freilich hat sich seine Richtigkeit immer überzeugender aufgedrängt, auf je mehr Gebiete ich ihn angewandt habe.

Wegen der Verweisungen sind neben der fortlaufenden Paginierung der Sonderausgabe die ursprünglichen Band- und Seitenzahlen der „*Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane*" in eckigen Klammern beibehalten.

Der Herr Verleger hat die Herstellung dieser Sonderausgabe durch sehr dankenswertes Entgegenkommen erleichtert.

Freiburg, im April 1897.

v. Kries.

Inhalt.



Über die Funktion der Netzhautstäbchen.

Von

J. von Kries.

I.

Unter den Erscheinungen, welche den Gegenstand der folgenden Erörterungen bilden, ist die am längsten bekannte diejenige, welche neuerdings gewöhnlich unter dem Namen des „Purkinjeschen Phänomens" aufgeführt wird. Ich zitiere hier die Beschreibung, welche Helmholtz in der ersten Auflage seiner *Physiologischen Optik* davon giebt. (S. 317.)

„Wenn ein rotes und ein blaues Papier bei Tageslicht gleich hell aussehen, so erscheint bei Einbruch der Nacht das blaue heller, das rote oft ganz schwarz. Ebenso findet man, dafs in Gemäldegalerien bei sinkendem Abend (einen trüben Himmel und fehlende Abenddämmerung vorausgesetzt) die roten Farben zuerst schwinden, die blauen am längsten sichtbar bleiben. Und in der dunkelsten Nacht, wenn alle anderen Farben fehlen, sieht man noch das Blau des Himmels. Noch auffallender habe ich diese Erscheinungen gefunden, wenn man prismatische Farben benutzt. Wenn man den im vorigen Paragraphen beschriebenen, in Figur 125 dargestellten Apparat zur Mischung von Spektralfarben benutzt und vor das Feld, welches mit den beiden Farben beleuchtet ist, ein senkrechtes Stäbchen hält, so wirft dieses zwei verschiedenfarbige Schatten. Da nämlich die beiden farbigen Lichter in verschiedener Richtung, nämlich von den beiden Spalten des letzten Schirmes (s. Fig. 125) her, auf das erleuchtete Feld fallen, so entwirft jedes den betreffenden Schatten in verschiedener Richtung. Wäre also z. B. Violett und Gelb gemischt, so würden wir einen Schatten haben, der nicht vom Violett, wohl aber vom Gelb beleuchtet ist, uns also gelb erscheint, einen anderen, der nicht vom Gelb, wohl aber vom Violett beleuchtet ist, uns violett erscheint,

während der Grund weiſs oder weiſslich wäre. Macht man nun den Spalt des Schirmes breiter, welcher das Violett durchläſst, so wird das Violett, also auch der violette Schatten lichtstärker, und man kann durch eine passende Regulierung der beiden Spalten leicht bewirken, daſs der violette Schatten dem Auge ebenso hell erscheint, wie der gelbe. Wenn man nun den einfachen Spalt des ersten Schirmes, durch welchen das vom Heliostaten reflektierte Licht zum Prisma tritt, erweitert oder verengert, so verstärkt oder schwächt man die ganze Lichtmasse, die in den Apparat tritt, und zwar alle ihre einzelnen farbigen Lichter in gleichem Verhältnisse, so auch in gleichem Verhältnisse das Licht des gelben und violetten Schattens. Dabei ergiebt sich, daſs schon bei einer geringen Verstärkung des Lichtes das Gelb stärker, bei einer geringen Schwächung das Gelb schwächer als das Violett erscheint."

Man bemerkt, und es sei darauf hier gleich ausdrücklich hingewiesen, daſs die Beobachtung hier ganz und gar auf eine Helligkeitsvergleichung verschiedenfarbiger Lichter gegründet wird. Daſs bei der Herabsetzung der Lichtstärke auch Veränderungen der Farbe, insbesondere der Sättigung, eintreten, war allerdings bekannt. Doch war nicht gerade in diesem Zusammenhange davon Notiz genommen worden.

In zwei wichtigen Beziehungen wurde unsere Kenntnis der einschlägigen Verhältnisse durch die Untersuchungen von Hering und Hillebrand[1] erweitert. Sie zeigten nämlich, daſs ein sehr lichtschwaches Spektrum von dem gut dunkeladaptierten Auge vollkommen farblos gesehen wird und dabei in einer Helligkeitsverteilung, welche von der gewöhnlichen, dem lichtstarken Spektrum eigentümlichen, sich sehr auffällig unterscheidet, so zwar, daſs das Helligkeitsmaximum gegen das brechbarere Ende verschoben ist, das rote Ende unter Umständen ganz unsichtbar sein kann, durchweg, wie man kurz sagen kann, in einem Paar ungleicher Farben von gleicher Helligkeit bei übereinstimmender Abschwächung eine Begünstigung des kürzerwelligen Lichtes eintritt. Die Beobachtung schlieſst, wie man sieht, das „Purkinjesche Phänomen"

[1] Hillerbrand, Über die spezifische Helligkeit der Farben (mit Vorbemerkungen von E. Hering). *Sitzungsber. d. Wien. Akad.* Math.-naturw. Kl. XCVIII. Abt. 3. S. 70. 1889.

ein, geht aber über die frühere Kenntnis der Erscheinung, wie gesagt, in zwei Punkten hinaus. Erstens nämlich durch die Auffindung der Thatsache, dafs bei der Verwendung sehr geringer Lichtstärken, bei denen die Begünstigung der kurzwelligen Lichter am auffälligsten ist, keine Farben mehr gesehen werden, sondern selbst die homogenen Lichter des Spektrums farblos erscheinen. Man konnte daher diese, den geringsten Lichtstärken eigentümliche Helligkeitsverteilung, wie es Hering und Hillebrand thaten, als Ausdruck der Lichtwirkung auf die schwarzweifse Sehsubstanz annehmen, welche rein zum Ausdruck kommt, solange die Reizwerte auf die „farbigen Sehsubstanzen“ unter der Schwelle bleiben, während bei höheren Intensitäten die Helligkeitsverteilung sich durch die Mitwirkung der farbigen Bestimmungen modifiziert. Das Helligkeitsverhältnis verschiedenfarbiger Lichter ändert sich, kann man also im Sinne Herings und Hillebrands sagen, mit Herabminderung der Intensität, und zwar in genauem Zusammenhange mit der anderen Erscheinung, dafs hierbei die farbigen Bestimmungen immer mehr zurücktreten und schliefslich die farblose Helligkeitsempfindung allein zurückbleibt. Der andere wichtige Punkt war der, dafs die Erscheinung durch Dunkeladaptation des Auges ungemein viel deutlicher wird, und dafs namentlich die Erscheinung des farblosen lichtschwachen Spektrums bei hochgradiger Dunkeladaptation in einer Deutlichkeit und Schönheit heraustritt, von der Beobachtungen mit weifs-ermüdetem Auge gar keine Vorstellung geben.

Die letzte Vervollständigung in unserer Kenntnis dieser Erscheinungen wurde dann in der Hauptsache durch Beobachtungen von König,[1] zum Teil auch durch solche von mir selbst gegeben; über letztere habe ich an anderer Stelle[2] kurz berichtet, wo auch bereits die in der gegenwärtigen Arbeit zu entwickelnden Schlufsfolgerungen skizziert sind. Einen Teil der dort berührten Versuche will ich hier an geeigneter Stelle wiederum anführen, auf einige gedenke ich erst bei einer späteren Gelegenheit wieder zurückzukommen. — König teilte

---

[1] A. König, Über den menschlichen Sehpurpur und seine Bedeutung für das Sehen. *Sitzungsber. d. Berl. Akad.* 1894. S. 577.

[2] v. Kries, Über den Einflufs der Adaptation auf Licht- und Farbenempfindung und über die Funktion der Stäbchen. Freiburg i. Br. 1894. (Abdruck aus den *Ber. d. Naturf. Gesellsch. zu Freiburg i. Br.* Bd. IX.)

nämlich mit, dafs diejenige Erscheinung, welche seit den Beobachtungen von Hering und Hillebrand als vorzugsweise wichtig gelten konnte, das Farbloserscheinen schwachen Lichtes von nicht zu grofser Wellenlänge, nicht mehr zu bemerken sei, sobald es sich um kleine leuchtende Felder handelt, deren Bild vollständig in die Fovea centralis fällt. Hier werde vielmehr mit alleiniger Ausnahme von einem Gelb (etwa 580 $\mu\mu$ Wellenlänge) jeder Lichtpunkt, sobald er überhaupt wahrnehmbar sei, auch sogleich in seiner Farbe erkannt. Ich kann mich dem in der Hauptsache nur anschliefsen. Wenigstens unterliegt es auch für mich gar keinem Zweifel, dafs das Auseinanderrücken der Helligkeits- und der Farbenschwellen, wie es beim dunkeladaptierten Auge und Beteiligung peripherer Netzhautpartien so leicht und charakteristisch zu sehen ist, bei genau fixierten kleinen Objekten gänzlich fehlt. Ob ein Spatium des Farbloserscheinens für das Zentrum überhaupt gar nicht oder in einem ganz minimalen Umfang existiert, ist aus naheliegenden Gründen sehr schwierig zu sagen; denn es kommt dabei immer darauf an, ob das Objekt, dessen Farbe noch nicht erkennbar ist und welches bei seitlich gewandtem Blick bemerkbar wird, zentral vollständig verschwindet oder auch auf der Fovea noch farblos sichtbar ist. Und zwar mufs dabei noch darauf geachtet werden, ob es bei Fixation sogleich (nicht etwa erst durch Ermüdung) verschwindet. Ich beschränke mich daher auch hier auf die Konstatierung, dafs ein solches Spatium, sei nun das Auge für Hell oder für Dunkel adaptiert, jedenfalls von allergeringstem Umfange ist. Den so leicht zu konstatierenden weiten Spielraum des Farbloserscheinens erhält man beim dunkeladaptierten Auge nur, wenn periphere Teile mit ins Spiel kommen. Gleichermafsen aber kann man behaupten, dafs auch das Purkinjesche Phänomen in seinem ursprünglichen engeren Sinne für die Stelle des deutlichsten Sehens nicht existiert. Ich setzte, um dies zu untersuchen, in den früher von mir beschriebenen Spektralapparat[1] ein kleines Diaphragma ein, so dafs von einem kleinen Kreise die obere und die untere Hälfte mit verschiedenem homogenem Licht, z. B. Rot und Blau,

[1] v. Frey und v. Kries, Über Mischung von Spektralfarben. *Arch. f. Physiol.* 1881. — Der jetzt von mir benutzte Apparat unterscheidet sich von dem älteren nur durch einige, der bequemeren Handhabung dienende Hinzufügungen.

erhellt werden konnte. Die Höhe des Okularspaltes konnte durch eine Schraube reguliert und so beide Lichter gleichmäfsig in ihrer Intensität variiert werden. Überdies konnte die Helligkeit jedes Feldes für sich durch die Weite des betreffenden Spaltes am Spaltenschirm geändert werden. Wenn ich hier die beiden letztgenannten Spaltweiten in das Verhältnis bringe, dafs bei allmählicher Verschliefsung und Öffnung des Okularspaltes das rote und das blaue Feldchen zugleich verschwinden und auftauchen, so kann ich auch bei hoher Intensität (immer natürlich Fixation vorausgesetzt) nicht finden, dafs das eine heller oder dunkler als das andere erschiene.[1]

Die uns beschäftigenden Erscheinungen lassen sich bei diesem Stande der Dinge sogleich noch unter einem anderen Gesichtspunkte darstellen, wobei sie übrigens wiederum mit altbekannten Thatsachen in eine neue Beziehung treten. Zeigte sich nämlich in der Netzhautperipherie eine Begünstigung der kurzwelligen Lichter, die für das Zentrum fehlte, so konnte man andererseits von einer Überlegenheit der Peripherie über das Zentrum reden, welche vorzugsweise für kurzwellige Lichter bestände, übrigens natürlich auch vorzugsweise für das gut dunkel adaptierte Auge bemerkbar sein mufste. In gewisser Beziehung

---

[1] Aus dem Fehlen des Purkinjeschen Phänomens für das Netzhaut-Zentrum erklärt sich auch eine Erscheinung, die mir seit Jahren bekannt war, ohne dafs ich ihr die Beachtung geschenkt hätte, die sie wohl verdiente. Als ich nämlich zuerst das Purkinjesche Phänomen in der Vorlesung demonstrieren wollte, fiel mir auf, wie schlecht dasselbe von den hinteren Bänken des Hörsaales aus zu sehen war. Es zeigte sich alsbald, dafs die Farbenfelder für die ziemlich grofse Entfernung zu klein waren, und ich fand notwendig, um die Erscheinung recht deutlich zu machen, den blauen und roten Feldern gröfsere Ausdehnung zu geben. Entsprechend fand ich denn auch, wenn ich ein rotes und blaues Feld herstellte, die, bei mäfsiger Beleuchtung und nur kleinem Abstand betrachtet, gleich hell erschienen, wie das Helligkeitsverhältnis sich immer mehr zu Ungunsten des Blau veränderte, wenn ich mich von dem Objekte mehr und mehr entfernte. Wie die Verminderung der Lichtstärke das Blau, so schien Verkleinerung des Gesichtsfeldes das Rot zu begünstigen. Mir entging aber damals, dafs dies nur so lange gilt, als man die kleinen Felder genau oder doch annähernd fixiert; in der That ist die Gröfse des Gesichtsfeldes nur deswegen von Einflufs auf die Erscheinung, weil bei gröfseren Feldern eben stets Seitenpartien der Netzhaut mit ins Spiel kommen. Das kleine Feld verhält sich anders nur, wenn es fixiert wird, aber ebenso wie das grofse, wenn man es indirekt betrachtet.

war dies, wie gesagt, bekannt; denn man wufste schon aus den Beobachtungen der Astronomen, dafs lichtschwache Objekte nur gesehen werden, wenn man an ihnen vorbeiblickt, und verschwinden, sobald man ihnen den Blick direkt zuwendet. Der Versuch lehrt aber leicht (und damit ist die Beziehung zu jenen anderen Beobachtungen hergestellt), dafs dies nur dann gilt, wenn man zu einer Beobachtung dieser Art nicht zu langwelliges Licht wählt; ferner, dafs solche Lichter, die bei direkter Fixation verschwinden, peripher zwar sehr deutlich, aber stets farblos gesehen werden,[1] und endlich, dafs homogenes Rot in beiden Hinsichten eine Ausnahmestellung einnimmt; es wird auch bei kleinster Intensität stets sogleich in seiner Farbe erkannt, und es läfst sich bezüglich seiner Wahrnehmung niemals eine Überlegenheit der Peripherie über das Zentrum, weder bei hell- noch bei dunkel-adaptiertem Auge, konstatieren.

Die angeführten Thatsachen lassen sich, ohne zunächst den Boden irgend einer hypothetischen Erklärung zu betreten, etwa folgendermafsen zusammenfassen: Bei geringer Lichtstärke und gut für das Dunkel adaptiertem Auge tritt (mit alleiniger Ausnahme der Stelle des deutlichsten Sehens) eine Art des Sehens hervor, welche 1. durch das Fehlen der Farben, 2. durch eine besonders hoch gesteigerte Empfindlichkeit für schwaches Licht, 3. endlich dadurch charakterisiert ist, dafs im Vergleich zum gewöhnlichen Sehen bei mittleren und hohen Lichtstärken eine Begünstigung des kurzwelligen Lichtes gegenüber dem langwelligen stattfindet, so zwar, dafs jene Steigerung der Empfindlichkeit überhaupt nur für mittel- und kurzwelliges Licht vorhanden ist, für das Rot aber fehlt. Wir haben es hier in der That mit einer ganz eigenartigen, von der gewöhnlichen verschiedenen Funktionsweise unseres Sehorgans zu thun, einer Funktionsweise, welche allein dem Zentrum abgeht. Auf der anderen Seite wissen wir seit lange von einem allein im Netzhaut-Zentrum fehlenden physiologisch-optischen Apparat, den Stäbchen. Es dürfte also wohl schon allein auf Grund des soeben Zusammengestellten ein sehr naheliegender Gedanke sein, dafs wir in dem Pur-

[1] Über die in dieser Beziehung zu machenden Vorbehalte vergl. u. S. 29.

KINJEschen Phänomen, besser gesagt in der eigentümlichen Art des Sehens bei schwachem Licht und dunkel-adaptiertem Auge die Funktion desjenigen Teiles unseres Gesichtsapparates vor uns haben, der die Stäbchen als Endapparat führt. Fragen wir zunächst, welche Eigenschaften wir im Sinne einer solchen Hypothese dem Stäbchenapparate zuschreiben müssen. Es wären die folgenden: 1. Totale Farbenblindheit, die Eigenschaft, bei Reizung mit jeder beliebigen Lichtart nur farblose[1] Lichtempfindungen zu liefern. 2. Eine Erregbarkeit vorwiegend durch mittel- und kurzwelliges Licht, so zwar, daſs im prismatischen Spektrum das Wirkungsmaximum im Grün liegt, während das rote Ende nahezu oder ganz unwirksam ist. 3. Eine sehr hochgradige Adaptationsfähigkeit, so daſs, wenn wir aus vollem Tageslicht uns in einen sehr schwach erhellten Raum begeben, die Erregbarkeit, anfangs schnell, später langsamer ansteigend, allmählich Werte erreicht, die die im Hellen stattfindenden um ein Vielfaches übertreffen.

Stellt man sich auf den Boden dieser Hypothese, so ergiebt sich eine ebenso einfache als interessante Vorstellung von der Teilung der optischen Funktionen zwischen dem Stäbchenapparat einer- und dem Zapfenapparat andererseits. Dieser letztere stellt einen farbentüchtigen (trichromatischen) Apparat dar, welcher bezüglich seiner Funktion auf eine etwas gröſsere Lichtstärke angewiesen ist und in seinen Empfindungseffekten sehr hohe Werte erreichen kann. Die Stäbchen stellen einen noch bei weit geringeren Lichtstärken funktionsfähigen

---

[1] Es ist, wie später noch zu berühren sein wird, keineswegs selbstverständlich, daſs die durch Reizung der Stäbchen bewirkte Empfindung genau mit dem zusammentrifft, was wir gewöhnlich farblos nennen, nämlich mit der Empfindung, die das gemischte Tageslicht, auf den wohl ausgeruhten (neutral gestimmten) Zapfenapparat wirkend, hervorruft; ist doch die letztere durch kosmische und meteorologische Verhältnisse, sowie auch durch wechselnde Beschaffenheiten der Augenmedien bestimmt, also im physiologischen Sinne etwas einigermaſsen Zufälliges. Es wäre also vielleicht richtiger, nicht zu sagen, daſs die Stäbchen farblose Empfindungen, sondern daſs sie einen nur einsinnig veränderlichen Empfindungseffekt liefern. Da indessen der Stäbcheneffekt sich schwerlich in erheblichem Maſse von der Farblosigkeit im gewöhnlichen Sinne unterscheidet, so schien es mir besser, den obigen, seine Bedeutung jedenfalls sehr viel anschaulicher kennzeichnenden Ausdruck beizubehalten.

Apparat dar, welcher aber farbenblind ist, nur Hell und Dunkel zu unterscheiden gestattet, vermutlich auch keine sehr intensiven Lichtempfindungen zu liefern vermag. Im allgemeinen werden wir bei hellem Lichte mehr mit den Zapfen, bei geringem mehr mit den Stäbchen sehen, und man könnte wohl kurzweg jene unseren Hellapparat, diese unseren Dunkelapparat nennen, womit jedoch selbsverständlich nicht gemeint wäre, dafs im hellen Lichte die Stäbchen gar nicht funktionierten, sondern nur, dafs ihre Effekte gegenüber denjenigen der Zapfen dann mehr zurücktreten. Es wird sich noch Gelegenheit finden, auf diese Funktionsteilung überhaupt und auch auf die Ausschliefsung der Stäbchen an der Stelle des deutlichsten Sehens vom Gesichtspunkte der Zweckmäfsigkeit aus einige Blicke zu werfen. Zunächst aber wird hier der Ort sein, darauf hinzuweisen, dafs die theoretische Vorstellung, zu der wir hier geführt werden, in ihren wichtigsten Punkten genau zusammentrifft mit den Anschauungen, welche Max Schultze bereits im Jahre 1866 auf Grund von nur dürftigen physiologischen Thatsachen, dafür aber einer um so beachtenswerteren Reihe vergleichend anatomischer Konstatierungen entwickelt hat.[1] M. Schultze konnte damals seine Ansicht, dafs die Stäbchen der farblosen Lichtempfindung dienten, nur ganz im allgemeinen auf den Umstand gründen, dafs unsere Farbenempfindungen in der Netzhautperipherie sehr viel unvollkommener als im Zentrum sind. Dagegen lehrte ihn die vergleichend anatomische Untersuchung, dafs sowohl bei Säugetieren als bei Vögeln diejenigen, welche nach ihrer Lebensweise besonders für das Sehen bei sehr geringem Licht eingerichtet sein müssen (Maus, Fledermaus, Katze, Igel, Maulwurf, Eule), eine an Stäbchen vorzugsweise reiche Netzhaut besitzen, während die Zapfen sehr zurücktreten oder sogar gänzlich fehlen. Die Anschauung, dafs die Stäbchen einen Dunkelapparat darstellten, der aber der Farbendifferenzierung ermangele, liefs sich hierauf ohne Zweifel mit einigem Recht gründen. Gegenwärtig kann man sagen, dafs sich die Funktion der Stäbchen in der physiologischen Beobachtung weit schärfer, als es damals möglich war, heraussondern läfst, und zwar 1. durch die für

[1] M. Schultze, Zur Anatomie und Physiologie der Retina. *Arch. f. mikrosk. Anat.* II. 1866. Besonders S. 255 f.

sie geltenden Helligkeitsverhältnisse der verschiedenen Lichtarten, 2. durch den sehr grofsen Einflufs der Adaptation und die damit gegebene Möglichkeit, bei gut dunkel-adaptiertem Auge diejenige Art des Sehens, welche wir auf die Stäbchen zu beziehen geneigt sind, in ganz vollkommener Trennung von der des trichromatischen Apparates aufzuweisen. Kein Zweifel also, dafs wir gegenwärtig die ganze Anschauung auf eine sehr viel gesichertere Basis stellen können, als dies vor nahezu 30 Jahren möglich war; trotzdem aber wird man in den vergleichend anatomischen Thatsachen wohl eine interessante Bestätigung der aus anderen Gründen sich aufdrängenden Vermutung erblicken dürfen.[1]

II.

Nach der soeben entwickelten Theorie kann die Empfindung des Weifsen oder einer farblosen Helligkeit im allgemeinen auf zwei verschiedene Weisen hervorgerufen werden, nämlich erstens durch beliebige Erregung der Stäbchen, zweitens durch Reizung des trichromatischen Zapfenapparates mittelst bestimmter Licht-

[1] Es ist merkwürdig, wie wenig Beachtung die Lehre M. Schultzes gerade bei denjenigen Physiologen gefunden hat, die sich speziell mit der Theorie des Farbensehens beschäftigten. Vielleicht erklärt sich dies zum Teil daraus, dafs gerade diejenige Thatsache, durch welche M. Schultze vornehmlich zu seiner Annahme geführt war, nämlich die Farbenblindheit der Netzhautperipherie, sich durchaus nicht ganz glatt und einfach aus ihr erklären läfst. Den Anatomen ist dagegen die Auffassung, dafs die Zapfen die Organe des Farbensinnes seien und die Stäbchen nur farblose Helligkeitsempfindung vermitteln, seit lange, wie es scheint, geläufig gewesen und geblieben. Cajal spricht davon wie von einer sichergestellten und bekannten Thatsache. (*Die Retina der Wirbeltiere.* Herausgegeben von Greeff. 1894. S. 166.) Soviel ich sehe, kann dies in letzter Instanz wohl nur auf die Aufstellungen M. Schultzes zurückgehen. Mir selbst war, als ich meine erste Mitteilung über diesen Gegenstand niederschrieb, wohl erinnerlich, dafs wegen der Farbenblindheit der Netzhautperipherie die Stäbchen vielfach, insbesondere von M. Schultze, als nur der farblosen Lichtempfindung dienende Endapparate betrachtet worden waren. Dagegen war mir aus dem Gedächtnis gekommen, was M. Schultze über die Bedeutung der Stäbchen als Dunkelapparate gelehrt hat; ich hätte sonst nicht unterlassen, gleich damals darauf hinzuweisen. Herr Geheimrat Heidenhain hatte die Freundlichkeit, mich damals sogleich auf die gute Übereinstimmung der von M. Schultze gefundenen Thatsachen mit meiner Hypothese über die Stäbchenfunktion aufmerksam zu machen.

gemische. Ich glaube und möchte im Folgenden dies ausführen, daſs hierin sehr einfach die Lösung gewisser Schwierigkeiten und Widersprüche gefunden werden kann, welche in letzter Zeit die Autoren vielfach beschäftigt haben. Es handelt sich dabei um die Frage, ob Mischungsgleichungen von der absoluten Intensität gemischter Lichter unabhängig sind, ob eine Mischungsgleichung, die bei bestimmter Intensität zutrifft, bei gleichmäſsiger Abschwächung oder Verstärkung sämtlicher Lichter ihre Gültigkeit stets bewahrt oder auch unter Umständen einbüſsen kann. Die Unabhängigkeit der Mischungsgleichungen von der Lichtstärke ist von Hering,[1] sowie von mir und Brauneck,[2] die Abhängigkeit dagegen von König und mehreren seiner Mitarbeiter[3] behauptet worden. Betrachten wir nun die Frage einen Augenblick a priori vom Standpunkte der obigen Theorie aus, so erscheint es als das Wahrscheinlichste, daſs die Mischungsgleichungen für jeden einzelnen der beiden unterschiedenen Apparate (den trichromatischen und den monochromatischen) von der Lichtstärke unabhängig sein möchten; dabei bestände aber die Möglichkeit, daſs für alle Stellen der Netzhaut, an welchen beide Apparate vorhanden sind, eine Abhängigkeit der Gleichungen von der absoluten Intensität bestände. Denn es würde die Gleichheit zweier Gemische bei hoher Lichtstärke in der Hauptsache darauf beruhen, daſs die Wirkungen auf die Zapfen übereinstimmten; ihre Stäbchenvalenz, wenn ich mich dieses Ausdrucks bedienen darf, könnte dabei aber ungleich sein, und dies würde bei herabgesetzter Lichtstärke sich bemerkbar machen, um so mehr, je besser das Auge dunkel-adaptiert ist. Wir haben, wie man auch sagen könnte, zwei Apparate und demgemäſs auch zwei verschiedene Reizungen, welche Weiſsempfindung liefern können; zwei Lichtgemische können gleich erscheinen, ohne daſs ihr Effekt auf jeden dieser Apparate gleich ist;

---

[1] Hering, Über Newtons Gesetz der Farbenmischungen. *Lotos.* VII. 1886. Ferner neuerdings: Über den Einfluſs der Macula lutea auf spektrale Farbengleichungen. *Pflügers Arch.* LIV. S. 177.

[2] von Kries und Brauneck, Über einen Fundamentalsatz aus der Theorie der Gesichtsempfindungen. *Arch. f. Physiol.* 1885. S. 79.

[3] Brodhun, Die Gültigkeit des Newtonschen Farbenmischungsgesetzes bei dem sog. grünblinden Farbensystem. *Zeitschr. f. Psychol.* V. S. 323.

Tonn, Über die Gültigkeit von Newtons Farbenmischungsgesetz. *Zeitschr. f. Psychol.* VII. S. 279.

da nun die Thätigkeit des einen und des anderen Apparates in sehr ungleicher Weise von den wechselnden Lichtstärken und von der Adaptation abhängt, so liegt im allgemeinen die Möglichkeit eines Wechsels der Mischungsgleichungen für alle extramakularen Netzhautteile vor. So verhält sich nun die Sache in der That. Die Angaben Herings sowie die von mir und Brauneck bestehen zu Recht, solange die Beobachtung auf das Zentrum beschränkt bleibt. Hiervon haben mich neuerlich angestellte Beobachtungen wieder überzeugt. Sobald man dagegen einmal darauf aufmerksam geworden ist, dafs die peripherischen Stellen einer gesonderten Beobachtung in dieser Hinsicht bedürfen, hat es für mich wenigstens keine Schwierigkeit, mich in verschiedenen, sogleich noch genauer anzuführenden Fällen von dem Ungültigwerden einer Mischungsgleichung durch Intensitätsverminderung und Adaptation zu überzeugen. Eine gewisse Entschuldigung für das frühere Übersehen dieses Umstandes darf wohl darin gefunden werden, dafs, wie dies ja seit lange bekannt ist, fast jede zentral gültige Mischungsgleichung peripher unrichtig ist wegen der Lichtabsorption im Pigment des gelben Fleckes. Da aber diese Erscheinung mit der untersuchten Frage direkt nichts zu thun hatte, so erschien die exzentrische Betrachtung lediglich als eine Störung, die man möglichst zu vermeiden suchen mufste.

So erklären sich meine und Braunecks negativen Resultate; von denjenigen Herings wird später noch zu reden sein. Andererseits ist leicht verständlich, dafs die betreffenden Erscheinungen alle am deutlichsten werden, wenn man, wie König und seine Mitarbeiter thaten, relativ grofse Farbenfelder benutzt. Allerdings aber ist bei diesem Verfahren die Deutung wegen Beteiligung ungleichwertiger Netzhautteile, ferner auch wegen der Pigmentierung des gelben Fleckes, derzufolge die Gleichungen überhaupt meistens nicht zugleich zentral und exzentrisch zutreffen können, keineswegs einwurfsfrei. Die Lösung liegt, wie gesagt, darin, dafs die Abhängigkeit der Gleichungen von der Lichtstärke zentral fehlt, peripher aber besteht. Über gewisse, bei der Anstellung dieser Versuche zu beachtende Vorsichtsmafsregeln wird weiter unten noch zu reden sein. Hier mag die Bemerkung genügen, dafs die nicht zu grofsen Felder [2—3° grofs] mit einer bestimmten extrafovealen Netzhautpartie betrachtet und verglichen werden, indem

eine feste Marke im passenden Abstande von ihnen als Fixationszeichen dient.

Was die Erscheinung im einzelnen angeht, so ist sie für mich am deutlichsten zu beobachten, wenn ich aus homogenem spektralem Rot und Grün ein Gelb mische, welches einem reinen spektralen Gelb (mit einem sehr geringen Weiſszusatz) gleich erscheint. Habe ich eine solche Gleichung für eine peripherische Netzhautstelle hergestellt und vermindere (durch Verkleinerung des Okularspaltes) die absolute Intensität beider Felder gleichmäſsig, so erscheint (immer mit dem gleichen peripherischen Netzhautteil) das gemischte Feld deutlich blasser und lichtstärker. Wir werden hierin einen Beweis dafür erblicken dürfen, daſs in dem Gemisch eine gröſsere Stäbchenvalenz steckt, als in dem homogenen Lichte. Es ist nicht überflüssig, darauf hinzuweisen, daſs sich dies mit den sonstigen vorliegenden Bestimmungen durchaus im Einklang befindet. Die für hohe Intensitäten geltende Mischungsgleichung lautet z. B. nach den Beobachtungen von Frey und mir: 14 Teile Gelb (ein wenig brechbarer als D) = 26 Teile Rot (C) + 15 Teile Grün (b), wobei die Lichtquantitäten nach dem Dispersionsspektrum des weiſsen Tageslichts gerechnet sind.[1] Nun ist bei isolierter Funktion der Stäbchen das Dispersionsspektrum des Tageslichts ungemein viel heller bei b, als bei D, wie z. B. aus den von Hering gefundenen Kurven[2] zu ersehen ist. Es ist also auch hieraus zu schlieſsen, daſs bei obiger, für helles Licht geltenden Gleichung die Stäbchenvalenz des aus Rot und Grün gemischten Gelb erheblich gröſser ist, als die des homogenen. Der äuſserst geringfügige Weiſszusatz, der zur Herstellung der vollkommenen Farbengleichheit erforderlich war, kommt hiergegen nicht in Betracht.[3]

---

[1] v. Frey und v. Kries, Über die Mischung von Spektralfarben. *Arch. f. Physiol.* 1881.

[2] *Arch. f. d. ges. Physiol.* 49. S. 598 u. 601.

[3] Selbstverständlich sind diese Berechnungen wegen der Pigmentierung der Macula lutea mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Nach den später zu erörternden Anschauungen Herings wäre anzunehmen, daſs eine Mischungsgleichheit stets nur bei Gleichheit der weiſsen Valenz, also der Stäbchenvalenz nach unserer Auffassung, zutreffen könne. Daſs sich dies nicht so verhält, daſs eine Mischungsgleichung mit Ungleichheit der Stäbchenvalenz möglich ist, folgt für mich im Grunde aus den hier in Rede stehenden Versuchen. Der erläuternde Hinweis

Die gleiche Betrachtung läfst sich auf eine unabhängig und nahe gleichzeitig von Ebbinghaus[1] und Chr. Ladd-Franklin angegebene Thatsache anwenden, die in mancher Beziehung ganz besonders beachtenswert ist, dafs nämlich auch ein aus Rot und Blaugrün und ein aus Gelb und Blau gemischtes Weifs, wenn sie bei hoher Intensität aller Bestandteile gleich erscheinen, durch Abschwächung ungleich werden, und zwar in dem Sinne, dafs die Rotgrünmischung das Übergewicht erhält. Zur Weifsmischung sind z. B. nach meinen älteren Bestimmungen erforderlich für 100 Teile Weifs 70 Teile Rot (C) + 140 Teile Blaugrün (etwas weniger brechbar als F), und andererseits 21 Teile Gelb (nahezu D) + 84 Teile Blau.[2]

Da nun die Stäbchenhelligkeit im Blau schon erheblich geringer ist, als im Grünblau (etwas rotwärts von F), so läfst sich auch hier noch leicht übersehen, dafs bei Lichtverminderung das aus Rot und Blaugrün gemischte Weifs das Übergewicht über das aus Gelb und Blau gemischte erhalten mufs.

Die Einrichtung meines Spektralapparates gestattet eine Ausführung des Versuches nicht genau in dieser Form. Es konnte ein unzerlegtes Weifs mit einem aus Rot und Blaugrün oder aber mit einem aus Gelb und Blau gemischten verglichen werden. Stelle ich die Mischungen für eine exzentrische Stelle zutreffend her und schwäche dann ab, so verdunkelt sich das unzerlegte Weifs deutlich stärker, als die Rotgrünmischung. Eine Mischung aus Gelb und Blau verdunkelt sich sehr annähernd gleich, wie das unzerlegte Weifs; eine Mischung aus Grünlichgelb und Violett etwas schneller.

---

auf sonstige, ohne Rücksicht auf die Macula-Absorption ausgeführte Versuche schien mir aber um so mehr zulässig, als ja Hering selbst die Weifsvalenz an den total Farbenblinden und zwei Trichromaten ohne besondere Berücksichtigung der Maculaverhältnisse bestimmte und sehr gute Übereinstimmung gefunden hat. Die hier erwähnten älteren Beobachtungen beziehen sich alle auf makulare Verhältnisse. Bei stark exzentrischer Betrachtung würde zur Gelbmischung relativ weniger Grün erfordert werden, dafür aber auch die Stäbchenvalenz des grünen Lichtes gegenüber derjenigen des gelben noch höher anzusetzen sein.

[1] Ebbinghaus, Theorie des Farbensehens. *Zeitschr. f. Psychol.* V, S. 137, 1893, Chr. Ladd-Franklin. *Nature* Vol. 48. S. 517.

[2] Erste und fünfte der für Herrn v. Frey geltenden Gleichungen in Tabelle V a. a. O.

Die erwähnten Beobachtungen von Chr. Ladd-Franklin und Ebbinghaus würden sich hier bestätigen. Einen direkten Vergleich der Stäbchenvalenz eines unzerlegten weißen Lichtes mit einem aus verschiedenen komplementären Paaren gemischten gestatten übrigens auch bereits vorliegende Beobachtungen. Wir finden bei König und Dieterici[1] die „Elementarempfindungskurven" für das Interferenzspektrum des Sonnenlichtes in den Tabellen XVI und XVII (a. a. O., S. 312) und die Helligkeitsverhältnisse für einen Monochromaten, die wir für die Stäbchenvalenzkurven gelten lassen dürfen, in Tabelle III (a. a. O., S. 225). Alle diese Zahlen sind so umgerechnet, daß die Areale der betreffenden Kurven über das ganze Spektrum den gleichen Wert haben. Nun ist z. B. für König zu äußerstem Rot (dessen Stäbchenvalenz vernachlässigt werden kann) komplementär ein blaugrünes Licht 496 $\mu\mu$. An dieser Stelle betragen die Ordinate der *G*- und *V*-Kurven etwa 2,7, dagegen ist die Ordinate der Stäbchenvalenz 4,6. Dies heißt also, daß im homogenen Blaugrün das Verhältnis der Stäbchenvalenz zu den Blau- und Grünwerten (trichromatischen Valenzen) anders ist, als im unzerlegten Gesamtweiß, nämlich im Verhältnis 4,6 zu 2,7 größer; mit anderen Worten: wenn ein homogenes Blaugrün von jener Wellenlänge und ein unzerlegtes Weiß für den trichromatischen Apparat gleiche Reizwerte haben und demgemäß das Blaugrün mit der erforderlichen Rotmenge dem unzerlegten Weiß gleich hell erscheint, daß alsdann ihre Stäbchenvalenzen nicht gleich sind, sondern sich etwa wie 4,6 zu 2,7 verhalten. Zu Violett (433 $\mu\mu$) ist rund die 1,5-fache Menge Grüngelb (577 $\mu\mu$) komplementär. Addieren wir für eine der „Elementarempfindungen" die Ordinate bei 433 und den 1,5-fachen Wert derjenigen bei 577, so erhalten wir rund den Wert 12, während die in gleicher Weise berechnete Stäbchenvalenz nicht ganz den Wert 4 erreicht. — Natürlich kann man auch hier den direkten Nachweis ungleicher Stäbchenvalenz bei einer für intensive Lichter gültigen Gleichung eben in dem Ergebnis des Verdunkelungsversuches erblicken. Es schien mir aber doch geboten, auf die übereinstimmenden Ergebnisse hinzuweisen, die die Berechnung älterer Versuche liefert.

---

[1] *Zeitschr. f. Psychol.* IV, S. 312 und 255.

Es erübrigt noch, zu zeigen, wie sich die von TONN mitgeteilte Erscheinung erklärt, dafs zu einem bestimmten Rot (Li_a) als komplementäres Licht eine mit abnehmender Intensität immer gröfsere Wellenlänge gewählt werden müsse. Auf den ersten Blick sollte man meinen, dafs die Verschiebung der Komplementärfarbe aus der Einmischung der Stäbchenthätigkeit sich nicht erklären lasse. Wir vergleichen die Einwirkung des ganzen Spektrums mit derjenigen eines Gemisches zweier homogenen Lichter. Ist für letzteres die Stäbchenvalenz die gröfsere, so wäre doch nur zu erwarten, dafs es bei Abschwächung heller oder dunkler werden würde, als das unzerlegte Licht, nicht aber eine Verschiebung des komplementären Punktes. Diese Argumentation gilt aber, wie man sieht, nur unter der Voraussetzung, dafs der Gesamteffekt des ganzen Spektrums auf den trichromatischen Apparat qualitativ genau die nämliche Empfindung liefert, wie die Erregung der Stäbchen, und ob dies der Fall ist, mufs von der Natur des angewandten Lichtes abhängen, welches das unzerlegte „Weifs“ liefert. Nehmen wir, um die Verhältnisse übersichtlich zu machen, sogleich an, das benutzte Weifs sei im Vergleich zum Stäbchen-Weifs merklich gelb, so suchen wir bei Bestimmung der Komplementärfarbe eigentlich eine solche, die mit dem Lithium-Rot ein dem unzerlegten Gesamtlicht gleichkommendes ungesättigtes Gelb liefert. Vermindern wir alsdann die Lichtstärke, so werden beide Lichter durch Auftreten der Stäbchenfunktion weniger gelb werden, dasjenige aber, dessen Stäbchenvalenz die gröfsere ist, erheblich mehr.

Dies ist nun stets, wie vorher schon gezeigt, die Rot-Blaugrün-Mischung. Es wird also nunmehr diese bläulich (weniger gelb) erscheinen; um die Gleichung wieder herzustellen, mufs die Wellenlänge der Komplementärfarbe etwas vergröfsert werden. Man kann den Sachverhalt auch kurz so ausdrücken: da bei abnehmender Lichtstärke das Rot-Grün-Gemisch wegen seiner gröfseren Stäbchenvalenz stärker abblafst, als das aus dem ganzen Spektrum gemischte Gelb, so müssen wir, um die Gelbwerte gleich zu halten, das Grün immer langwelliger wählen. Damit stimmen nun die Erscheinungen ganz überein. Denn in der That ist das von TONN benutzte Weifs, eine von einem Triplexbrenner erleuchtete Magnesiumoxydfläche, stark gelblich gewesen. Dies geht schon daraus hervor, dafs bei hoher Licht-

stärke für Lithium-Rot die Komplementärfarbe $\lambda = 510$ gefunden wurde, während sie für wirkliches Weiſs nach den Beobachtungen von Helmholtz, Frey und mir, König und Dieterici sich etwa zwischen 486 und 495 $\mu\mu$ bewegte.

Rein theoretisch genommen, ergeben die Versuche dieser Art die Möglichkeit, dasjenige Weiſs zu bestimmen, welches die gleiche Empfindung hervorruft wie die Stäbchenerregung, welches also ein „physiologisches Weiſs“ par excellence wäre. Es müſste dadurch charakterisiert sein, daſs alle Lichtgemische, welche diese bestimmte Empfindung hervorrufen, bei Abschwächung der Lichtstärke qualitativ gleich bleiben; d. h., um die volle Gleichheit herzustellen, würde eine Vermehrung oder Verminderung eines Gemisches in toto, keine Änderung des Verhältnisses der Bestandteile in einem der Gemische erforderlich sein. Indessen sind für die Farbentüchtigen die Unterschiede der Stäbchenvalenz wohl stets zu gering, als daſs ein solcher Versuch mit Aussicht auf einen genauen Erfolg unternommen werden könnte.

Ganz das Gleiche ergeben nun auch, nur mit noch sehr viel gröſserer Deutlichkeit, die Beobachtungen der Dichromaten. Der einfachste Fall ist hier der, daſs eine Gleichung zwischen einem farblos erscheinenden homogenen Licht und einem aus Rot und Blau bestehenden Gemische hergestellt wird. Man kann aus den von Tonn mitgeteilten Kurven sogleich ersehen, daſs in einer solchen Gleichung die Stäbchenvalenz sehr verschieden sein muſs, und zwar in dem homogenen Licht weit gröſser. Demnach ist zu erwarten, daſs bei geringer Lichtstärke und dunkel-adaptiertem Auge eine solche Gleichung unrichtig werden, und zwar das homogene Licht weit heller erscheinen würde. In der That ist nun dies aus den von Tonn mitgeteilten Zahlen zu entnehmen. Dieselben gestatten nämlich leicht, zu sehen, wieviel rotes Licht (645 $\mu\mu$) und wieviel blaues (435 $\mu\mu$) in dem Gemisch genommen werden müssen, um der Mengeneinheit des homogenen gleich zu erscheinen. Ist W_λ und W_{645} die Höhe der W-Kurven für das betreffende homogene Licht und für die Wellenlänge 645, so ist jene Rotmenge $= \frac{W_\lambda}{W_{645}}$, und bei analoger Bedeutung ist die Menge des blauen $= \frac{K_\lambda}{K_{435}}$. Aus den von Tonn mitgeteilten

Zahlen kann man solcherart ermitteln, dafs bei den geringsten Intensitäten ein farbloses homogenes Licht etwa einer 3—4 fach gröfseren Menge eines Blau-Rot-Gemisches gleich erschien, als bei hohen.

In jüngster Zeit bin ich in der Lage gewesen, mich von der Richtigkeit dieser Beobachtungen ganz direkt und mit Hinzunahme guter Dunkel-Adaptation in der frappantesten Weise zu überzeugen. An einem Helmholtzschen Farbenmischungsapparate stellte Hr. Dr. W. Nagel, der Dichromat ist, eine Gleichung zwischen einem ihm farblosen Blaugrün und einer Mischung aus Rot und Blau ein, und zwar für hell-adaptiertes Auge und mittlere Intensitäten. Wurden nun durch Verkleinerung des Okularspaltes alle Lichter gleichmäfsig stark abgeschwächt und die Felder nach längerer Zeit mit dunkel-adaptiertem Auge betrachtet, so erschien ihm und ganz ebenso mir das homogene Licht weit heller. Gleichgültig war dabei, ob die Gleichung für zentrale oder exzentrische Teile hergestellt war; gleichgültig auch, ob sie nach Abschwächung mehr oder weniger peripher betrachtet wurde; nur bei kleinem Felde und direkter Fixation (also ausschliefslicher Beteiligung des Zentrums) schienen die Gleichungen durchweg gültig zu bleiben; wenigstens konnte auch Hr. Dr. Nagel hier keine Abweichungen konstatieren.

Besonders hervorgehoben sei, dafs das Auftreten jener Helligkeitsdifferenzen auch an derselben Netzhautstelle, für die die Gleichung hergestellt war, in sicherster Weise beobachtet wurde.

Wenn nun eine für den Dichromaten gültige Mischungsgleichung nach Abschwächung und Dunkel-Adaptation für ihn selbst wie für den Farbentüchtigen auf der extramakularen Netzhaut völlig unzutreffend ist, so ergiebt sich daraus wohl zweifellos, dafs hier Gleichungen vorliegen, die für höhere Lichtstärken zutreffen, während die Stäbchenvalenzen ungleich sind.

Es würde sich nun fragen, ob auch die sämtlichen anderen von Tonn mitgeteilten Abweichungen vom Newtonschen Farbenmischungsgesetz bei Dichromaten sich aus dem gleichen Prinzip einer mit abnehmenden Lichtstärken mehr hervortretenden Stäbchenfunktion verständlich machen lassen. Ohne den noch nicht abgeschlossenen Versuchen des Hrn. Dr. Nagel über diesen

Punkt vorgreifen zu wollen, glaube ich doch sagen zu dürfen, dafs es sich wohl aller Wahrscheinlichkeit nach so verhalten dürfte; denn qualitativ stimmen die beobachteten Abweichungen durchaus mit der Theorie überein.

Betrachten wir die Gleichung, die zwischen irgend einem homogenen Licht (λ) und einem Rot-Blau-Gemisch hergestellt wird, so früge sich zunächst, auf welcher Seite die Stäbchenvalenz gröfser ist.

Wenn nun W, K und S die Ordinaten der W- und K-Kurve bei hoher Lichtintensität und diejenigen der Stäbchenvalenzkurve (Helligkeiten bei geringster Lichtstärke) sind, so kommt es darauf an, ob $\frac{W_\lambda}{W_{645}} \cdot S_{645} + \frac{K_\lambda}{K_{435}} \cdot S_{435}$ gröfser oder kleiner als S_λ ist. Die Betrachtung der TONNschen Kurven ergiebt nun, dafs durchweg die Stäbchenvalenz des homogenen Lichtes die überwiegende ist.[1] Hiernach läfst sich also erwarten, dafs bei Abschwächung stets das homogene Licht stärker als das Gemisch abblassen werde, und dafs, um Gleichheit zu erhalten, das Verhältnis des Blau zum Rot sich mit abnehmender Intensität immer in der Richtung gegen einen bestimmten Wert verändern werde, nämlich gegen den, welcher eine farblose Empfindung (genauer gesagt, eine mit dem Stäbcheneffekt übereinstimmende) liefert. In der That ergeben nun die Beobachtungen von Hrn. RITTER, dafs, indem die Intensität von 240 auf 1 vermindert wird, das Verhältnis des blauen zum roten Anteil sich ändert für Wellenlänge

610 $\mu\mu$	von	0,005	auf	0,06
590 "	"	0,017	"	0,125
550 "	"	0,09	"	4,3
530 "	"	0,18	"	6,1
510 "	"	0,88	"	8,1
490 "	"	4,5	"	10,5

[1] Wenigstens von Wellenlänge 590 $\mu\mu$ abwärts steht dies aufser Zweifel; bei 610 kann man vielleicht bezweifeln, ob bei den schon kleinen S-Werten das Verhältnis noch mit hinreichender Sicherheit beurteilt werden kann, besonders für den Rotblinden. Der Ausfall der Abschwächungsversuche macht wahrscheinlich, dafs auch hier das homogene Licht die gröfsere Stäbchenvalenz besitzt.

470 $\mu\mu$ von 27 auf 21
450 „ „ 196 „ 18.[1]

Die Beobachtungen der Herren Henze und Schulz führen zu ganz entsprechenden Ergebnissen. Bei Verminderung der Intensität von 240 auf 1 (bei Henze) oder 240 auf 10 (Schulz) ändert sich z. B. das obige Verhältnis für Wellenlänge

550 $\mu\mu$ von 0,25 auf 16 (H.)
und „ 0,52 „ 11,6 (Sch.),

dagegen bei

470 $\mu\mu$ von 202 auf 81 (H.)
und „ 204 „ 134 (Sch.)

Das Verhältnis des blauen zum roten Anteil mufs also (bei Abschwächung) in der weniger brechbaren Hälfte des Spektrums vermehrt, in der brechbareren vermindert werden; in der Gegend des neutralen Punktes, etwas weniger als 490 $\mu\mu$, dürfte es ungeändert bleiben.

Die etwas weniger ausgedehnten Versuche Brodhuns (dieser benutzt als brechbareren Bestandteil des Gemisches Licht von der Wellenlänge 460 $\mu\mu$) bestätigen für die weniger brechbare Hälfte des Spektrums das Gleiche. Der Gang der Versuche entspricht also, wie man sieht, durchaus der theoretischen Erwartung.[2]

In genauestem Zusammenhange hiermit steht eine andere, viel erörterte Erscheinung, nämlich das sog. Wandern des

---

[1] Bei 470 und 450 $\mu\mu$ mufs der Vergleich auf die Abnahme der Intensität von 240 auf 2 resp. auf 10 beschränkt bleiben, da sich bei den noch kleineren Intensitäten der *W*-Anteil = 0 angegeben findet, d. h. eine Bestimmung der Farbe nicht mehr möglich war.

[2] Die Erscheinungen lassen sich noch in etwas anderer Weise betrachten. Wenn wir in einer der erwähnten Mischungsgleichungen die Intensität vermindern und alsdann die gröfsere Stäbchenvalenz des homogenen Lichtes hervortritt, so mufs sich dies darin bemerklich machen, dafs dieses heller erscheint, als das Rot-Blau-Gemisch, und streng genommen müfste die Gleichheit wieder hergestellt werden, indem dem letzteren eine gewisse Menge einer gerade farblos erscheinenden Rot-Blau-Mischung hinzugefügt würde. Diese Folgerung läfst sich an den von Tonn mitgeteilten Zahlen nach einer ähnlichen Umrechnung, wie sie oben benutzt wurde, prüfen. Da es indessen wohl sehr fraglich ist, ob die Beobachtungen alle genau genug sind, um eine solche quantitative Verwertung noch zulässig zu machen, so genüge es hier, mitzuteilen, dafs, wie ich finde, die Zahlen des Herrn Ritter, auch in solcher Weise behandelt, zur Theorie recht gut stimmen. Bei Abschwächung mufs, um

neutralen Punktes mit der Intensität. Dafs es sich auch hier um die Einmischung der bei abnehmender Lichtstärke hervortretenden Stäbchenfunktion handelt, wird schon dadurch wahrscheinlich, dafs (man vergleiche die von Tonn gegebenen Kurven, a. a. O., S. 294) ein Wandern des neutralen Punktes nur innerhalb sehr geringer Lichtstärken zu bemerken ist, während seine Lage vollkommen konstant bleibt, sobald die Lichtstärke einmal gewisse Werte erreicht hat, trotz sehr bedeutender weiterer Steigerung. Im übrigen ist wohl sofort ersichtlich, dafs für das Wandern des neutralen Punktes bei Dichromaten ganz die gleiche Erklärung heranzuziehen sein wird, wie für das Wandern der Komplementärfarbe bei Trichromaten. Es erscheint nicht verständlich, wenn das benutzte Weifs, auf den dichromatischen Apparat wirkend, eine Empfindung hervorruft, welche dem Stäbchenweifs qualitativ genau gleich ist. Wenn dagegen ein stark gelbliches Weifs benutzt wird, so blafst mit abnehmender Intensität das homogene Licht wieder stärker ab, als das unzerlegte Weifs; es mufs also, um die Gleichung richtig zu erhalten, eine gröfsere Wellenlänge gewählt werden.

Sehen wir nun, wie sich die thatsächlich beobachteten Erscheinungen hierzu verhalten, so finden wir, dafs das Wandern des neutralen Punktes am stärksten in den Beobachtungen des Herrn Ritter zu bemerken ist (von 510 bis auf 549 $\mu\mu$), welcher als Weifs eine von Gaslicht beleuchtete Magnesiumoxydfläche benutzte. Dafs das hier benutzte Weifs recht stark gelblich gewesen sein mufs, wurde schon oben erwähnt. In den älteren Versuchen Königs, in denen Wolken-

Gleichheit zu erhalten, im Gemisch sowohl das Rot wie das Blau vermehrt werden. Die Mengen stehen da, wo sie erheblich sind, etwa im Verhältnis 1 : 8 (nach Spaltbreiten gerechnet), was einem homogenen Lichte von ca. 490 $\mu\mu$ und demgemäfs dem wahren neutralen Punkte annähernd entspricht. (Vgl. über den neutralen Punkt die im Text sogleich folgende Auseinandersetzung.) Bei den Beobachtungen der Herren H. und Sch. stimmen die Ergebnisse der gleichen Berechnung für das rote Ende des Spektrums nicht zur Theorie, doch waren diese Beobachter auch, wie Tonn angiebt, weniger geübt, und der unregelmäfsige Verlauf der Kurven in ihrem linken Endstück läfst wohl die Vermutung kleiner Beobachtungsfehler hier gerechtfertigt erscheinen. Eine Verwertung der Beobachtungen in der hier versuchten Weise wird, wie man leicht sieht, bei relativ kleinen Ungenauigkeiten bereits illusorisch.

licht benutzt wurde, und in denen von Brodhun, wo ein Gemisch aus Rot und Blau benutzt wurde, war bei hoher Intensität der neutrale Punkt bei einer merklich kleineren Wellenlänge, und es ist demgemäfs auch das „Wandern“ geringfügiger (von 487 bis 493 bei König und 496 bis 510 bei Brodhun).

Brodhun giebt auch ganz direkt an (a. a. O., S. 326), dafs es „das monochromatische Licht war, welches bei Intensitätsänderungen seine Farbe änderte oder wenigstens in weit höherem Grade änderte, als die Mischung. Wenn der Farbenton beider Felder im Farbenmischapparat etwa so gewählt war, dafs er mir gelblich erschien, so wurde bei Herabsetzung der Intensität beider Felder der Ton des homogenen Feldes bläulicher, während der der Mischung gelblich blieb“. Nun läfst sich aber weiter auch aus den von Tonn mitgeteilten Versuchen direkt entnehmen, dafs, wenn man das „Weifs“ zur Ermittelung des neutralen Punktes noch etwas bläulicher wählt, die Wanderung desselben bei Intensitätsverminderung bereits in entgegengesetzter Richtung (gegen das Violett hin) stattfindet; denn im Grunde ist ja dieses Verhalten ganz identisch mit dem schon oben besprochenen, dafs homogene Lichter der brechbaren Spektralhälfte bei Abschwächung blasser (weniger blau) erscheinen, als ein Blau-Rot-Gemisch, dem sie bei hoher Intensität gleich sind; das homogene Licht mufs für geringe Intensitäten, um die Gleichung gültig zu erhalten, brechbarer gewählt werden. Allerdings ist dies Wandern gegen das violette Ende bis jetzt nur für Blau-Rot-Gemische beobachtet; es unterliegt aber wohl keinem Zweifel, dafs es für ein unzerlegtes, aber stark ins Blau ziehendes Weifs gleichfalls stattfinden mufs. Mir scheint also aus den von Tonn zusammengestellten Beobachtungen nur zu folgen, dafs das zur Ermittelung des neutralen Punktes angewandte Weifs gelblicher erschien, als das „Stäbchen-Weifs“.

Ganz in Analogie mit dem, was oben hinsichtlich des Trichromaten auseinandergesetzt wurde, bieten diese Versuche theoretisch die Möglichkeit, den neutralen Punkt par excellence zu bestimmen, nämlich dasjenige Licht, welches im dichromatischen Apparate eine dem Stäbcheneffekt gleiche Empfindung hervorruft. Dieser neutrale Punkt würde gar nicht „wandern“, während man Wanderung gegen das Rot hin erhält, wenn man

das Weiſs gelblicher, und gegen das Violett, wenn man das Weiſs bläulicher wählte. Wie genau eine solche Bestimmung ausfallen kann, entzieht sich vorderhand der Beurteilung. Doch kann man auch nach den vorliegenden Bestimmungen schon sagen, daſs der betreffende Punkt von dem im gewöhnlichen Sinne für weiſses Tageslicht bestimmten sich nicht sehr erheblich entfernen kann und wahrscheinlich etwas blauwärts von ihm liegt.

Die im Obigen gegebene Zusammenstellung zeigt also, daſs die sämtlichen bisher beobachteten Abweichungen vom Newtonschen Farbenmischungsgesetz sich einer einfachen Regel subsumieren lassen. Die für hohe Intensitäten geltenden Gleichungen werden bei Abschwächung aller Lichter und Dunkeladaptation in dem Sinne unrichtig, daſs dasjenige Gemisch, welches die gröſsere Stäbchenavalenz besitzt, einen Überschuſs von farbloser Helligkeit erhält.[1] Da nun dies gerade das ist, was nach der Theorie erwartet werden muſs, so darf wohl gesagt werden, daſs auch dieses Erscheinungsgebiet ihr zur Stütze gereicht.

III.

Ein kleinerer oder gröſserer Teil der hier erörterten Erscheinungen ist von anderen Autoren zur Entwickelung wesentlich anderer theoretischer Anschauungen verwendet worden. Eine Erörterung, wieweit diese den Thatsachen gerecht werden, was für und was gegen sie spricht, kann an dieser Stelle nicht umgangen werden.

Zuvörderst ist hier der von Hering und Hillebrand aufgestellten Theorie von der spezifischen Helligkeit der Farben zu gedenken. Gelb und Rot sind helle, ebenso wie das Weiſs auf Dissimilierung beruhende, Grün und Blau dunkle, ebenso

---

[1] Eine Ausnahme macht hier lediglich die Beobachtung Alberts (*Wiedemanns Annalen* XVI, S. 129), nach welcher bei Abschwächung ein homogenes Gelb rötlicher, ein aus Rot und Grün gemischtes grünlicher werden soll. Indessen handelt es sich hier wohl zweifellos um Täuschungen durch den Wechsel zentraler und exzentrischer Betrachtungen, ein Punkt, dessen Bedeutung damals noch wenig bekannt war. Ein für die Fovea richtig aus Rot und Grün gemischtes Gelb erscheint exzentrisch stets deutlich grün wegen der hier fortfallenden oder geringeren Absorption des grünen Anteils. Ich kann etwas anderes als das Hellerwerden und stärkere Abblassen des Gemisches nicht konstatieren.

wie das Schwarz dem Assimilierungsprozesse entsprechende Farben. In der bei geringster Lichtstärke und dunkeladaptiertem Auge stattfindenden Helligkeitsverteilung haben wir den Ausdruck der weifsen Valenzen zu erblicken (Helligkeitsmaximum des Dispersionsspektrums im Grün), welche hier, ohne Beteiligung der farbigen Sehsubstanzen, rein zum Ausdruck kommen. Bei steigender Lichtstärke treten die farbigen Sehsubstanzen in Aktion, und da nun durch die Mitwirkung von Rot oder Gelb eine Zunahme, durch die von Grün oder Blau aber eine Verminderung der Helligkeit erfolgt, so greift die Verschiebung der Helligkeitsverhältnisse zu Gunsten der langwelligen Lichter Platz, wie sie die Beobachtungen eben thatsächlich ergeben haben. Es ist kein Zweifel, dafs die Theorie diejenigen Thatsachen, aus deren Anlafs sie entstanden ist, in völlig zutreffender Weise erklärt. Aber ich glaube, dafs man in Bezug auf eine Anzahl der später bekannt gewordenen Thatsachen nicht das Gleiche sagen kann.

Zunächst sind wir gezwungen, den Anteil, den die farbigen Sehsubstanzen an der Bestimmung der Helligkeit haben sollen, gelegentlich als einen weit gröfseren und selbständigeren aufzufassen, als es wohl ursprünglich gedacht wurde. Denn wir können nicht umhin, dem spektralen Rot eine Wirkung auf die schwarzweifse Sehsubstanz ganz abzusprechen. Hering konnte dem von ihm untersuchten total Farbenblinden die rote Kaliumlinie überhaupt nicht sichtbar machen. Und, wie ich früher mitgeteilt habe, (a. a. O., S. 8), verhält sich selbst nach hochgradiger Belichtung mit rotem Licht die Netzhaut schwachen kurzwelligen Lichtern gegenüber ähnlich, wie eine dunkel adaptierte. Wir müfsten uns also denken, dafs intensive rote Lichter ihre unter Umständen ja enorm starken Helligkeiten ganz ohne Beteiligung der schwarzweifsen Sehsubstanz erzeugen können.

Dafs in dieser Vorstellung gegenüber den Grundanschauungen der Heringschen Theorie eine gewisse Schwierigkeit liegt, wird man kaum in Abrede stellen können; indessen wird man sie vielleicht nicht unüberkömmlich finden.

Auf ernstere Schwierigkeiten führt aber die Erwägung der Fovea-Funktionen. Auf den ersten Blick zwar könnte man meinen, das Fehlen des Purkinjeschen Phänomens und der ganzen farblosen Wahrnehmung schwacher kurzwelliger Lichter sei

darauf zurückzuführen, daſs hier die schwarzweiſse Sehsubstanz relativ zu den farbigen weit schwächer vertreten ist, als überall in der Peripherie. Allein die genauere Prüfung führt hier doch auf Widersprüche. Denn wenn selbst bei hochgradiger Dunkel-Adaptation eine isolierte Erregung der schwarzweiſsen Sehsubstanz nicht gelingt, so müſste das Übergewicht der farbigen jedenfalls ein derartiges sein, daſs bei hell-adaptiertem Auge eine merkliche Erregung der farbigen Sehsubstanzen zu erzielen wäre durch Lichter, die für die schwarzweiſse unter der Schwelle liegen. Ein unter solchen Umständen zentral schwach bemerkbares Licht müſste dann, sofern es rot oder gelb ist, heller, sofern es grün oder blau ist, dunkler als die Umgebung erscheinen, was doch niemals der Fall ist. Wie ist es ferner zu verstehen, daſs intensive grüne und blaue Lichter zentral in gröſster Helligkeit gesehen werden? Darauf, daſs der Verdunkelungseffekt dieser Farben bald eine nicht überschreitbare Grenze erreicht, werden wir nicht rekurrieren können, wenn wir uns erinnern, wie beim roten Licht, welches auf die schwarzweiſse Sehsubstanz nicht wirkt, der Helligkeitseffekt bis zu höchsten Werten anwachsen kann.

Mir scheint hiernach, daſs die Lehre von der spezifischen Helligkeit der Farben zum mindesten auf Bedenken stöſst, sobald man diejenige Voraussetzung, unter der sie ja auch allein aufgestellt wurde, nämlich die eines sehr erheblichen Übergewichts der schwarzweiſsen Sehsubstanz über die farbigen, fallen lassen will. In entscheidenderer Weise würde die Theorie mit den oben geschilderten Abweichungen vom Newtonschen Farbenmischungsgesetz in Widerspruch geraten, besonders mit der Beobachtung von Chr. Ladd-Franklin und Ebbinghaus über die ungleiche Verdunkelung eines aus Rot und Blaugrün und eines aus Gelb und Blau gemischten Weiſs. Indessen steht einer sicheren Verwertung dieser Beobachtung vorläufig der Umstand entgegen, daſs ihre Richtigkeit von Hering bestritten wird. Nach ihm soll vielmehr jede Mischungsgleichung unabhängig von der absoluten Intensität aller Lichter gültig bleiben, wenn sie nicht mit zu groſsen Gesichtsfeldern und wenn sie in allen Fällen auf der gleichen Netzhautstelle geprüft wird. Verwendet man dagegen zu groſse Felder, so gewinnt bei der Abschwächung dasjenige Lichtgemisch das Übergewicht, dessen „weiſse Valenz das gröſsere makulare

Gefälle“ besitzt. Die Gleichungen würden also dann immer bei hoher Intensität mehr nach Maſsgabe derjenigen Teile eingestellt, in denen die Lichtabsorption durch die Macula lutea am stärksten ist, bei geringer mehr nach Maſsgabe der seitlichen Teile; eine ganz richtige Gleichung sei für die groſsen Felder aber wegen der ungleichen Verteilung des absorbierenden Pigmentes gar nicht herzustellen; man erhalte da immer nur scheinbare Gleichungen durch lokale Adaptation, und diese vollzieht sich bei hohen und niederen Lichtintensitäten nicht gerade in der gleichen Weise.

Wie schon erwähnt, muſs ich dieser Angabe Herings insofern zustimmen, als auch ich die Mischungsgleichungen für kleine und direkt fixierte, also auf der Fovea abgebildete Felder von der absoluten Intensität unabhängig finde. Für exzentrisch betrachtete Felder finde ich dagegen trotz sorgfältiger Beobachtung aller von Hering urgierten Vorsichtsmaſsregeln die oben geschilderten Erscheinungen deutlich. Da man sich nicht leicht entschlieſsen wird, hier an individuelle Verschiedenheiten zu glauben, so erwähne ich einige Punkte, die in Betracht kommen können. Ich habe, um die Felder des Spektralapparates in beliebiger Exzentrizität betrachten zu können, vor dem Okularspalt ein kleines Streifchen eines mikroskopischen Deckgläschens derart schräg angebracht, daſs dadurch ein seitlich aufgestelltes Fixationszeichen, an dem Glasplättchen gespiegelt, im Gesichtsfeld erschien. Das Fixationszeichen, ein minimales Gasflämmchen, konnte dann leicht in beliebige scheinbare Abstände gebracht werden. Das Gesichtsfeld meines Apparates ist etwa ein stehendes Oval von 22 mm Höhe und 12 mm Breite, welches aus einer Entfernung von 42 cm betrachtet wird. Die Trennungslinie ist horizontal. Das Fixationszeichen stellte ich so, daſs es rechts oder links horizontal neben der Trennungslinie erschien, und daſs sein scheinbarer Abstand vom Rand der Felder etwa 15—25 mm betrug. Das Feld konnte durch Einsetzung kreisförmiger Diaphragmen verkleinert werden.

So habe ich die Erscheinung noch deutlich gefunden bei Anwendung von Feldgröſsen und Exzentrizitäten, bei denen die Ungleichmäſsigkeit der Pigmentierung sicher keine Rolle mehr spielen konnte, da die Feldergleichheit gegen kleine Blickschwankungen keineswegs mehr empfindlich war, z. B.,

um bestimmte Zahlen anzuführen, bei Diaphragma 11 mm und 15 mm scheinbarem Abstand des Fixierzeichens.

An dem in letzter Zeit in den Besitz des hiesigen Instituts gelangten Farbenmischapparat nach Helmholtz habe ich die Beobachtungen mit gleichem Erfolge wiederholt (z. B. bei Feldgröfse 1,8° und Abstand des Fixierzeichens vom Rande des Feldes 2,5°). Ich mufste mich übrigens auch hier auf die Vergleichung der Rot-Blaugrün- mit einer Gelbblau-Mischung beschränken, da das Licht der Triplexbrenner zu wenig Violett liefert, um die Gelbgrün-Violett-Mischung verwenden zu können.

Gegenüber etwaigen Bedenken, auf die die Verminderung der Lichter durch seitliche Verengerung des Okularspaltes stofsen könnte, sei bemerkt, dafs bei meinem Apparate nur durch Höhenveränderung des Okularspaltes abgeschwächt wurde. Da als Lichtquelle ein dem diffusen Tageslichte ausgesetztes weifses Papierblatt diente, die Spalte also in ihrer ganzen Höhe gleich hell waren, so ist dieses Verfahren vollkommen zuverlässig.

Der wichtigste Punkt mag übrigens der sein, dafs zwar in gewissem Mafse immer durch Abschwächung der Lichter die Stäbchenfunktion mehr hervortritt, aber in vollem Mafse nur, wenn man die Verdunkelung sehr weit treibt und den Adaptationswechsel des Auges zu Hülfe nimmt. Man mufs also die Gleichungen hoher Lichtstärken mit hell-, und diejenigen geringer mit gut dunkel-adaptiertem Auge prüfen. Hering hatte, soviel ich sehe, zu der Anwendung dieses Verfahrens keinen Anlafs und ist wohl auch nicht so zu Werke gegangen. Unterläfst man dies, so sind die Unterschiede geringfügig und können bei der Unsicherheit der Vergleichung auf exzentrischen Stellen wohl unmerklich werden.

Im übrigen wird natürlich abzuwarten sein, ob und in welchem Sinne sich die hiernach bestehenden Widersprüche etwa durch weitere Beobachtungen lösen lassen. Dagegen darf wohl darauf hingewiesen werden, dafs die von Hering aufgestellte Regel für die scheinbaren Veränderungen auf gröfseren Feldern (bei Abschwächung erscheint dasjenige Lichtgemisch heller, dessen weifse Valenz das gröfsere makulare Gefälle hat) vorderhand selbst noch keine eigentliche Erklärung gefunden hat. Hering selbst hat, nachdem er die Konstanz der Mischungsgleichungen für kleine Felder konstatiert hat, sich mit der

Aufstellung jener Regel begnügt und ausdrücklich hinzugefügt, es solle damit nur der Weg bezeichnet sein, auf dem die Erklärung zu suchen sei.

Noch weit wichtiger aber ist es, daſs die HERINGsche Erklärung den entsprechenden Beobachtungen der Dichromaten in keiner Weise gerecht wird. Wenn der Dichromat ein homogenes Blaugrün einem Blau-Rot-Gemisch gleich macht, so wird, wie oben angeführt, diese Gleichung für geringe Lichtstärke und dunkel-adaptiertes Auge völlig unzutreffend. Die weiſse Valenz ist hier im Gemisch fast ausschlieſslich durch das blaue Licht repäsentiert; das makulare Gefälle wird also eher für das Gemisch gröſser sein. Die Erscheinung ist überdies so ungemein deutlich, daſs auch über ihr Bestehen bei Beobachtung an konstanter Netzhautstelle und auf kleinem Felde kein Zweifel aufkommen kann. Nichts kann frappanter und belehrender sein, als selbst die Blaugrün-Purpur-Gleichung eines Dichromaten nach starker Herabsetzung aller Lichter und mit dunkel adaptiertem Auge zu betrachten. Man sieht dann aufs deutlichste, daſs von einer Gleichheit auch nicht entfernt die Rede ist, mag man selbst weniger oder mehr peripher beobachten, mag der Dichromat die Gleichung zentral oder mehr peripher eingestellt haben, und mag das Feld gröſser oder kleiner sein, vorausgesetzt nur, daſs man nicht rein zentral beobachtet.

Für den Dichromaten kann also meines Erachtens als sichergestellt angesehen werden, daſs zwei ihm farblos erscheinende Lichter (ein homogenes und eine Mischung) bei hoher Intensität gleich, bei geringer und dunkel adaptiertem Auge sehr ungleich erscheinen können. Ist aber dies so, so folgt unmittelbar, daſs die im letzteren Falle in Betracht kommenden Reizwerte nicht die Weiſsvalenzen im Sinne HERINGS sein können. Und man wird überhaupt, ohne zu sehr künstlicher Annahme zu greifen, kaum der Folgerung ausweichen können, daſs farblose Helligkeitsempfindung an allen extramakularen Netzhautstellen durch Wirkung auf zwei verschiedene Apparate entstehen kann, von denen bei hellem Licht mehr der eine, bei schwachem mehr der andere ins Spiel kommt.

Mit der Gewinnung dieses Ergebnisses glaube ich mich hier begnügen zu können; denn wenn man dasselbe anerkennt, so wird, wie ich glaube, auch vom Standpunkte der HERING-

schen Theorie aus die hier vertretene Anschauung von der Funktion der Stäbchen als die wahrscheinlichste bezeichnet werden müssen. Man kann dieselbe, wie mir scheint, acceptieren und mit Bezug auf den trichromatischen Apparat, die Lehre von der spezifischen Helligkeit der Farben aufgebend, wieder auf die ursprünglichen Vorstellungen zurückgehen, ohne sich mit den Grundlagen der Theorie in Widerspruch zu setzen. Jedenfalls wäre es verfrüht, etwa noch denkbare andere Modifikationen der Theorie zu diskutieren, ehe jemand sie aufgestellt hat und für sie eingetreten ist.

IV.

In zweiter Linie hätte ich mich hier mit der von A. König entwickelten Theorie auseinanderzusetzen. Diese stimmt zunächst mit den auch von mir vertretenen Anschauungen insoweit ganz überein, als auch K. das Sehen mit dunkel-adaptiertem Auge bei geringen Lichtstärken den Stäbchen resp. dem Sehpurpur zuschreibt. Hiervon abgesehen aber möchte König in den Stäbchen resp. dem Sehpurpur den Träger der von der Young-Helmholtzschen Theorie angenommenen Blau-Komponente sehen, und zwar so, daſs die stärkere Zersetzung des Sehpurpurs, besonders aber auch die Weiterzersetzung des aus diesem zunächst entstehenden Sehgelb Blauempfindung hervorriefe. Die der Stäbchen und des Sehpurpurs ermangelnde Fovea centralis sei demgemäſs blaublind. Lassen wir die allgemeinen Bedenken auſser Spiel, die man wohl dagegen haben darf, daſs derselbe Apparat bei schwacher Erregung farblose Helligkeitsempfindung und bei Steigerung der gleichen Reizung Blauempfindung liefern solle, so scheinen mir doch in mehreren Richtungen dieser Betrachtungsweise unüberwindliche Schwierigkeiten zu erwachsen. Nicht haltbar dürfte zunächst die Ansicht von der Blaublindheit der Fovea sein; denn es unterliegt doch keinem Zweifel, daſs wir kleine blaue (auch monochromatische) Punkte bei direktem Fixieren sehen, und daſs wir sie auch blau sehen. Wie ich schon in meiner ersten Mitteilung auseinandersetzte, besteht das zentrale Verschwinden kleiner blauer Gegenstände, in welchem König eine Bestätigung seiner Ansicht von der Blaublindheit der Fovea findet, nur insofern, als solche Gegenstände, wenn sie hinreichend licht-

schwach sind, um zentral zu verschwinden, peripher farblos gesehen werden. Ich möchte dem hier hinzufügen, daſs ich die Möglichkeit nicht bestreiten will, daſs ein lichtschwacher blauer Punkt, der zentral unsichtbar ist, in kleinem Abstand von der Fovea auch noch blau sichtbar wird; es würde dies in der Pigmentierung des gelben Fleckes und der daselbst stattfindenden Absorption des blauen Lichtes eine ausreichende Erklärung finden.[1] Daſs aber die Fovea überhaupt keine Blauempfindung erzeuge und blaue Objekte gar nicht sehe, kann ich nach meinen Erfahrungen schlechterdings nicht bestätigen. Rein blaue Objekte von nicht gar zu geringer Lichtstärke sehe ich, auch wenn ihr Bild ganz auf die Fovea fällt, und ich sehe sie sicher blau; ich bringe sie nie zentral zum Verschwinden. Es ist mir auch nicht glaublich, daſs dieser Miſserfolg, wie man ja zunächst glauben könnte, auf mangelhafter Fixation beruhen soll. Denn bei stark dunkel adaptiertem Auge hat es für mich nicht die geringste Schwierigkeit, mich von dem zentralen Verschwinden solcher kleinen Objekte zu überzeugen, die peripher sogar sehr stark sichtbar sind. Und es gelingt dies, wie ich finde, meistens sogar wenig geübten Beobachtern. Nicht blaublind ist also die Fovea, sondern, wenn wir es mit einem bereits gebräuchlichen Namen kurz bezeichnen wollen, hemeralopisch; ihr fehlt nicht das Vermögen, Blau zu sehen, sondern das Vermögen, sehr schwache Lichter zu sehen, die die Peripherie farblos sieht. Allerdings macht sich dies vorzugsweise gegenüber kurzwelligem Lichte bemerklich, weil eben dieses Vermögen der Peripherie, schwaches Licht zu sehen, vor allem bei kurzwelligen Lichtern hervortritt.

Abgesehen von diesen Einwänden gegen eine Blaublindheit der Fovea, Einwänden, die inzwischen in mehr oder weniger ähnlicher Weise auch von anderer Seite[2] erhoben worden sind, scheinen mir weitere Schwierigkeiten auch mit der Annahme

---

[1] Ich habe etwas Derartiges nie mit Sicherheit beobachten können. Freilich ist es sehr schwierig, zu sagen, ob ein solches lichtschwaches Pünktchen völlig farblos oder etwa eine Spur bläulich erscheint. Daſs ein peripher deutlich wahrnehmbares Blau zentral verschwände, kommt bei mir sicher nicht vor.

[2] Gad, Der Energieumsatz in der Retina. *Arch. f. Physiol.* 1894. S. 491. Hering, Über angebliche Blaublindheit der Fovea centralis. *Pflügers Arch.* LIV. S. 403.

verknüpft, daſs einerseits stärkere Zersetzung des Sehpurpurs, andererseits aber besonders Zersetzung des aus ihm gebildeten Sehgelbs Ursache der Blauempfindung sei. Die letztere Annahme kann, wenn man den Stäbchen sowohl die Blauempfindung als die farblose Wahrnehmung schwächster Lichter zuschreiben will, deshalb nicht umgangen werden, weil (das lehren die Beobachtungen an Dichromaten sowohl wie an Trichromaten) der Blaukomponente unmöglich eine Erregbarkeitskurve zugeschrieben werden kann, die sich mit der Helligkeitsverteilung in schwächstem Lichte deckte. Diese letztere zeigt im Dispersionsspektrum ihr Maximum in Grün; die „*K*-Kurven" für hohe Intensität verlaufen ganz anders.

Auf der anderen Seite wird man aber auch nicht denken können, daſs die Empfindung des Blau an die Zersetzung des Sehgelbs allein gebunden sei; denn wir sehen ja thatsächlich auch mit einem völlig ausgeruhten Auge, welches keine erheblichen Mengen von Sehgelb enthalten kann, sehr gut blau. Es ist also eine unentbehrliche Konsequenz der Grundvorstellungen, daſs sowohl Zersetzung des Purpurs als Zersetzung des Sehgelbs Blauempfindung liefern können. Wenn nun aber dies so wäre, so müſste, wie mir scheint, das ja zweifellos in sehr erheblichem Maſse wechselnde Verhältnis, in dem die Stäbchen Purpur und Sehgelb enthalten, sich in einer hochgradigen Variabilität der Mischungsgleichungen, auch bei Anwendung ziemlich heller Lichter, verraten, was thatsächlich keineswegs der Fall ist. Jede Mischungsgleichung, bei der die Blaukomponente beteiligt ist, müſste, sofern sie für ein mäſsig hell adaptiertes, an Sehgelb reiches Auge richtig hergestellt ist, für das vollkommen dunkel adaptierte Auge im ersten Moment durchaus falsch sein. Wie soll man sich denken, daſs bei der Betrachtung des hellen Objektes sozusagen mit einem Schlage eine ganz bestimmte Menge von Sehgelb entsteht und alsdann auch dauernd das Verhältnis von Purpur und Sehgelb sich konstant erhält? Soweit die Beobachtungen am Präparate ein Urteil gestatten, ist die Zersetzbarkeit des Sehgelbs weit geringer, als die des Purpurs; es müſste daher wohl das Verhältnis des ersteren zum unzersetzten Purpur eine erhebliche Zeit lang beständig zunehmen.

Was die neuerdings von Ebbinghaus aufgestellte Theorie des Farbensehens anlangt, so richten sich auch gegen sie die Bedenken, die ich soeben gegen die Vorstellung erhob, daſs

die Blauempfindung auf einer Zersetzung des Sehgelbs beruhen sollte. Nimmt man ferner, wie EBBINGHAUS thut, als gesichert an, daſs auch die Zapfen der Fovea mit dem Substrat der Blauempfindung ausgerüstet sind, so vermag ich schlechterdings keinen Grund zu sehen, weshalb nicht dies von den Zapfen der extrafovealen Teile in gleicher Weise angenommen werden soll, und weshalb man hier die Blauempfindung in einen anatomisch getrennten und mit ganz anderen Leitungsverhältnissen ausgerüsteten Endapparat verlegen soll. Hiermit gelangen wir dann wieder zu der Vorstellung, daſs die Zapfen überhaupt einen trichromatischen Apparat darstellen. Auf diesem Standpunkte nun erscheint von denjenigen Gedanken, die der EBBINGHAUSschen Theorie eigentümlich sind, noch einer beachtenswert und diskutierbar, die Annahme nämlich, daſs in den Zapfen mehrere (E. nimmt zwei an) lichtempfindliche und gefärbte Stoffe zu einem farblosen Gemenge vereinigt seien.

Man wird, glaube ich, darüber ziemlich einig sein, daſs die Möglichkeit eines solchen Verhaltens gewiſs im Auge zu behalten ist, da es uns an einer begründeten Vorstellung darüber, welche Wirkungen das Licht in den Zapfen hervorruft, zur Zeit überhaupt fehlt. Als wirklich begründet könnte aber eine solche Anschauung doch wohl erst gelten, wenn es gelungen wäre, diese Farbstoffe sichtbar darzustellen. Dies müſste um so mehr verlangt werden, wenn man auch diesen lichtempfindlichen Substanzen eine Änderung ihrer Farbe (Verschieſsen, Ausbleichen) durch Licht zuschreibt. Nach der spezielleren, von EBBINGHAUS entwickelten Anschauung müſsten, soviel ich sehe, in einem bei Natronlicht präparierten Dunkelauge die betreffenden Teile der Zapfen infolge der Zusammenmengung eines roten und eines grünen Farbstoffes nahezu schwarz, jedenfalls sehr dunkel erscheinen. In entschiedenem Widerspruche mit der Erfahrung scheint mir die Annahme zu stehen, daſs die Empfindungen des Blau und Grün auf den sekundären Weiterzersetzungen des Sehgelbs (resp. der aus einem grünen Farbstoffe durch Lichtwirkung entstehenden roten Substanz) geknüpft sein soll. Denn, wie vorher schon erwähnt, ist das völlig ausgeruhte Auge sofort zu jeder Farbenempfindung befähigt; es ist also wohl kaum möglich, anzunehmen, daſs gewisse Farbenempfindungen an Substanzen geknüpft sind, die sich erst unter der Einwirkung des Lichtes bilden.

Endlich sei hier erwähnt, dafs die Annahme, nach welcher die Stäbchen nur zur Hervorbringung farbloser Lichtempfindung befähigt sind, auch in der Theorie der Lichtempfindungen sich findet, welche von Chr. Ladd-Franklin entwickelt worden ist.[1] Leider ist hier die Abweichung der für die Stäbchen und der für die Zapfen geltenden Helligkeitsverteilung gar nicht berührt und somit auch die einfache Erklärung, welche sich für eine Reihe von Thatsachen (Purkinjesches Phänomen etc.) gerade hieraus ergiebt, kaum angedeutet (vielleicht gar nicht bemerkt?) worden. Es hängt dies wohl mit dem der Theorie eigentümlichen Hauptgedanken zusammen; denn der Schwerpunkt liegt, soviel ich sehe, in der Beziehung, die zwischen farbigen und farblosen Empfindungen durch die Annahme von „Graumolekülen“ und „Farbenmolekülen“ hergestellt wird, wobei die letzteren aus den Graumolekülen durch Differenzierung in der Weise entstanden sein sollen, „dafs die Atome der Aufsenschicht sich nach drei zueinander senkrechten Richtungen verschieden gruppiert haben“. Ich gestehe, dafs eine derartige Konstruktion meinen physikalischen und chemischen Vorstellungen zu fern liegt, als dafs ich mich in sie hinein denken könnte. Wenn aber angenommen wird, dafs die Zapfen Farbenmoleküle, die Stäbchen nur Graumoleküle enthalten, und wenn dann weiter betont wird, dafs durch die Wirkung gewisser Lichtgemische auf die Farbenmoleküle eine nervenerregende Substanz entsteht, welche genau dieselbe Beschaffenheit hat, wie die äufsere Schicht der Graumoleküle, so scheint mir der Versuch, zwischen den monochromatischen Elementen und den trichromatischen eine bestimmte Beziehung anzugeben, gerade von den Erklärungsmöglichkeiten abzuführen, die an sich in der Unterscheidung jener beiden Elemente liegen. Denn zu diesem Ende müssen wir uns vor allem auf die sehr wesentlichen Unterschiede der Lichtwirkung auf den einen und den anderen Apparat stützen.

V.

Ich habe in meiner ersten, die Funktion der Stäbchen betreffenden Mitteilung (a. a. O., S. 11) die Vermutung ausgesprochen, dafs die Erscheinung des sog. Purkinjeschen

---

[1] *Zeitschr. f. Psychol.* IV. S. 211 und *Mind* N. S. II. S. 473.

Nachbildes auf eine Funktion der Stäbchen und das Zeitverhältnis ihrer Wirksamkeit gegenüber der der Zapfen zurückzuführen sei. Es ist mir bis jetzt nicht möglich gewesen, dieses recht reichhaltige Erscheinungsgebiet systematisch zu untersuchen, und ich mufs mich daher hier auf wenige Bemerkungen beschränken, um so mehr, da dem Gegenstande von anderer Seite her eine Anzahl von Arbeiten in neuerer Zeit gewidmet worden sind.[1] Sehen wir hinter einem bewegten, farbig leuchtenden Körper eine kurze gleichfarbig leuchtende Linie und dann einen längeren farblosen oder schwach komplementär gefärbten Schweif hinlaufen, so sondert sich auch hier wieder die farblose Helligkeitsempfindung von der primären farbigen so deutlich, dafs es nahe liegt, an einen nur farblos empfindenden und relativ lange Nachwirkung des kurzen Reizes zeigenden Apparat zu denken. Die Vermutung, dafs ein solcher Schweif die in den Stäbchen länger andauernde Reizung darstellt, bestätigte sich durch die Beobachtung, dafs er im roten Lichte fehlt. Dies habe ich damals mitgeteilt, ohne zu wissen, dass Bidwell einige Wochen zuvor die gleiche Thatsache bekannt gegeben hatte.[2]

Ich habe auch gelegentlich konstatiert, dafs der Schweif sich merklich verlängert, wenn man das Auge stark seitlich

---

[1] Hess, Über die nach kurzdauernder Reizung des Sehorganes auftretenden Nachbilder. *Pflügers Arch.* Bd. 49. S. 190.

Snellen, *Über Nachbilder. Verhandlungen der ophthalmol. Gesellschaft zu Heidelberg.* 1893.

Bosscha, Primäre, sekundäre und tertiäre Netzhautbilder nach momentanen Lichteindrücken. *Arch. f. Ophth.* XL. 2. S. 22.

Charpentier, *Arch. de Physiol.* 1892, S. 541.

Bidwell, On the recurrent images following visual impressions. *Proceedings of the R. Society.* June 1894.

Als ältere, den Gegenstand betreffende Litteratur sei hier erwähnt:

Purkinje, *Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne.* S. 111.

S. Exner, Der Erregungsvorgang im Sehnervenapparate. *Sitzungsber. d. Wien. Akad. Math.-naturw. Kl.* 3. Abt. Bd LXV. 1872.

Young, Note on recurrent vision. *Philos. Magazine.* 1872. S 343.

Davis, *On recurrent vision.* Ebenda. 1872. S. 526.

[2] Übrigens hat schon Davis das Fehlen der recurrent vision bei Anwendung eines roten Lichtes konstatiert; auch Hess hat Ähnliches gefunden und aus der sehr schwachen Wirkung des roten Lichtes auf die schwarzweifse Sehsubstanz erklärt.

wendet und das (natürlich durch ein Uhrwerk gleichmäfsig bewegte) Licht über stark peripher gelegene Teile der Netzhaut gleiten läfst, ein Umstand, der wohl im gleichen Sinne gedeutet werden kann. Für eine detailliertere Deutung des ganzen Phänomens scheinen mir aber doch noch manche weitere Beobachtungen erforderlich. Wenn die meisten Autoren das sekundäre Bild als dem primären komplementär beschreiben, andere aber auch als gleich gefärbt, so liegt hier ein Widerspruch vor, der allerdings wohl aus der verschiedenen Reaktionsweise des trichromatischen Apparates je nach Intensität und Dauer des Lichtreizes sich erklären wird, aber doch einer solchen Aufklärung noch bedürfte. Wichtiger noch ist der andere Punkt, ob nämlich die sekundäre Helligkeit von der primären durch ein Intervall der Dunkelheit geschieden ist. Exner hatte dies nicht gesehen, ich selbst in meinen damals mitgeteilten Versuchen nur einige Male mich von seiner Existenz überzeugen können, während die anderen Autoren es als regelmäfsig vorhanden angeben. Ich habe mich neuerdings davon überzeugt, dafs es hier sehr wesentlich auf die Wahl passender Lichtstärken, aber auch auf den Adaptationszustand des Auges ankommt. Unter geeigneten Umständen sieht wohl jeder, dafs das Nachbild, von dem primären durch einen deutlichen dunklen Zwischenraum getrennt, hinter diesem herläuft. Präsentiert sich die Erscheinung in dieser Form, bei welcher der kurze Lichtreiz etwa $^1/_5$ Sekunde nach der ersten eine zweite Helligkeitsempfindung hervorzurufen scheint, so läge es ja freilich am nächsten, hierin den stark verspäteten Beginn der Stäbchenerregung zu erblicken. Indessen hat es doch auch grofse Bedenken, dem Dunkelapparat eine so träge Reaktion zuzuschreiben, und ich möchte für diese Erklärung hier nicht ohne weiteres eintreten. Denkbar wäre ja auch, dafs die Stäbchen die Eigentümlichkeit besäfsen, mit einer Doppelerregung im Zeitintervalle von etwa $^1/_5$ Sekunde zu antworten, oder dafs das für kurze Zeit sehr starke negative Nachbild des trichromatischen Apparates den Stäbcheneffekt erst nach einer gewissen Zeit zur Geltung kommen liefse u. dergl. Weitere Untersuchungen finden hier wohl noch manchen Angriffspunkt; für den Augenblick erscheint mir die Deutung noch in vielen Detailpunkten ungewifs, wenn auch die Auffassung der Nacherregung als einer Stäbchenfunktion gewifs sehr wahrscheinlich ist.

In ähnlichem Sinne sei hier der angeborenen totalen Farbenblindheit Erwähnung gethan. Nachdem durch HERING gezeigt war, dafs für gewisse Fälle von angeborener totaler Farbenblindheit die Verteilung der Helligkeit im Spektrum ganz die gleiche war, wie für das dunkel-adaptierte normale Auge im schwachen Licht (wobei auch dieses farblos sieht) ergab sich als selbstverständliche Konsequenz der oben dargelegten Theorie die Vermutung, dafs jene „Monochromaten" Stäbchenseher seien, eine Anschauung, zu der übrigens CHR. LADD-FRANKLIN und KÖNIG von ihren theoretischen Vorstellungen aus ebenfalls bereits gelangt waren.

Diese Deutung der Erscheinungen wird sich, von manchem anderen abgesehen, auch dadurch empfehlen, dafs sie eine einfache Erklärung für die herabgesetzte Sehschärfe und die Lichtscheu jener total Farbenblinden ergiebt.[1] Da, soweit sich bis jetzt sagen läfst, das Sehen jener Monochromaten mit demjenigen Sehen des Trichromaten, welches wir als Stäbchenfunktion auffassen, ganz übereinstimmt, so liefert gewissermafsen die Erscheinung der totalen Farbenblindheit den Beweis für die Isolierbarkeit jener Funktion und kann daher unserer Hypothese jedenfalls zur Stütze dienen. Doch mufs eine eingehendere Besprechung auch dieses Gegenstandes späterer Gelegenheit vorbehalten bleiben.

VI.

Die obigen Darlegungen gestatten wohl die zusammenfassende Behauptung, dafs die hier entwickelte Theorie der Stäbchen- und der Zapfenfunktion 1. für das PURKINJEsche Phänomen und die Erscheinung des sog. lichtschwachen Spektrums, 2. für die von KÖNIG und seinen Mitarbeitern beobachteten Abweichungen vom NEWTONschen Farbenmischungsgesetz eine einfache und durchsichtige Erklärung bietet; dafs sie 3. die Erscheinungen der totalen Farbenblindheit und 4. das sog. PURKINJEsche Nachbild (recurrent vision) in einer interessanten Weise unserem Verständnis näher rückt; und dafs sie 5. in dem schon von MAX SCHULTZE festgestellten Überwiegen

[1] Vergl. hierüber v. KRIES, Über den Einflufs der Lichtstärke auf zentrale und periphere Sehschärfe. *Centralbl. f. Physiol.* 26. Jan. 1895.

der Stäbchen und der Reduktion der Zapfen bei Dunkeltieren eine merkwürdige Bestätigung findet.

Die Betrachtung der Stäbchen als eines farbenblinden und besonders für die Funktion in schwachem Licht befähigten Apparates scheint mir in mehreren Beziehungen von weitergehender Bedeutung, so daſs dem Gegenstande wohl noch einige allgemeine Bemerkungen gewidmet werden dürfen. Erstlich wird es befriedigen müssen, daſs es gelingt, einem anatomisch differenzierten und phylogenetisch sich absondernden Teile des Sehapparates seine gesonderte Funktion zuweisen zu können. Betrachtet man sodann die Einrichtungen unter dem Gesichtspunkte der Zweckmäſsigkeit, so erscheinen sie in verschiedenen Beziehungen interessant und verständlich. Wir können zunächst verstehen, daſs die Aufgabe, bei schwächstem Lichte zu sehen, am besten unter Verzicht auf die farbigen Bestimmungen gelöst werden kann, da alsdann alle Lichtarten zur Hervorbringung des gleichen Effekts sich vereinigen. Naturgemäſs erscheint ferner auch, daſs der Dunkelapparat eine vorzugsweise hohe Adaptationsfähigkeit besitzt. Denn die sehr groſse Lichtempfindlichkeit, die im Dunkel gefordert wird, würde ohne eine solche Einrichtung bei hellem Licht zu groſsen Störungen führen. Auch bezüglich der Frage, weshalb an der Stelle des deutlichsten Sehens die Stäbchen fehlen, können wir uns wohl einigermaſsen Rechenschaft geben. Natürlich wäre es ja wohl für uns noch vorteilhafter, wenn wir auch in sehr schwachem Licht die volle räumliche Unterscheidungsfähigkeit besäſsen, deren wir uns bei gröſserer Helligkeit erfreuen. Man sieht aber, daſs der höchste Grad räumlicher Unterscheidung eine durchaus isolierte Leitung für jeden Endapparat erfordert (wie sie für die Foveazapfen verwirklicht ist), während dagegen die Empfindlichkeit gegen schwaches Licht voraussichtlich dadurch begünstigt wird, daſs eine gröſsere Zahl von Endapparaten ihre Wirkung vereinigt, daſs der Erregungseffekt, wie Cajal es ausdrückt, sich bei seinem Vordringen in der Netzhaut immer mehr konzentriert. Wenn es hiernach ohnehin zweckmäſsig schien, bei dem Dunkelapparat auf den höchsten Grad der Sehschärfe zu verzichten, so erscheint es dann weiter durchaus zweckentsprechend, an einer kleinen Stelle der Netzhaut den Dunkelapparat ganz auszuschlieſsen und dadurch das höchste Maſs

von Sehschärfe und Farbensinn wenigstens für helleres Licht zu erzielen. Wie wenig ein zentrales Skotom von geringer Ausdehnung sich störend bemerklich macht, das lehrt der Umstand, dafs, obleich wir in schwachem Licht stets mit einem solchen Skotom behaftet sind, die wenigsten Menschen überhaupt hiervon etwas bemerken.

In Bezug auf die Funktionsweise der Stäbchen drängen sich noch weitere Fragen auf, die hier kurz berührt werden müssen. Schon König hat darauf hingewiesen, dafs zwischen der Helligkeitsverteilung im lichtschwachen Spektrum und der Lichtabsorption durch den Sehpurpur eine angenäherte Übereinstimmung stattfindet. Auch die Lebhaftigkeit, mit der Lichter verschiedener Wellenlänge auf den Sehpurpur einwirken, entspricht etwa diesen Verhältnissen. Ob eine genaue Übereinstimmung stattfindet, läfst sich wohl vorläufig nicht sagen, da hierzu die Absorptionserscheinungen, speziell des menschlichen Sehpurpurs, zu wenig bekannt sind. Immerhin wird wohl mit grofser Wahrscheinlichkeit vermutet werden können, dafs die Zersetzung des Sehpurpurs für die Erregung der Stäbchen von Bedeutung sei.[1] Wie steht es nun bei dieser Anschauungsweise um das Sehgelb? Es wird sich fragen, ob auch seine Weiterzersetzung noch mit einer Erregung einhergeht oder nicht. Diese Frage erscheint einer experimentellen Beantwortung nicht ganz unzugänglich. Man kann nämlich ein blaues und ein grünes Licht, beide von geringer Intensität und farblos erscheinend, einmal mit einer nur kurz für dunkel adaptierten und voraussichtlich an Sehgelb noch reichen, sodann mit einer sehr lange dunkel-adaptierten Netzhaut vergleichen. Erschiene bei dem ersteren Zustande das Helligkeitsverhältnis zu Gunsten des Blau verschoben, so könnte man auf eine Mitwirkung der Sehgelbzersetzung bei der Stäbchen-

[1] Im Zweifel kann man vorderhand auch darüber sein, ob die Zersetzung des Sehpurpurs direkt der die Erregung bestimmende Vorgang ist, oder etwa der Sehpurpur als ein Sensibilisator die photochemische Wirkung auf eine andere Substanz begünstigt, wobei dann seine eigene Zersetzbarkeit wesentlich die Bedeutung einer Adaptationseinrichtung haben würde. Da indessen die Helligkeitsverteilung im Spektrum für die Monochromaten keine oder jedenfalls keine sehr auffällige Abhängigkeit von absoluter Lichtstärke und Adaptationszustand zu zeigen scheint, so dürfte wohl die Auffassung des Sehpurpurs als eines Sensibilisators zunächst nur wenig Wahrscheinlichkeit für sich haben.

erregung schliefsen. Ich habe solche Versuche nicht gerade in systematischer Weise, sondern gelegentlich angestellt, ohne ein Ergebnis in jenem Sinne konstatieren zu können. Natürlich aber wäre es voreilig, auf dies negative Ergebnis hin dem Sehgelb die Erregungsbedeutung ganz abzusprechen. Denn bei der überhaupt nur geringen Zersetzbarkeit dieses Körpers ist es sehr denkbar, dafs die Lichtwirkung auf ihn gegenüber derjenigen auf den Sehpurpur nicht erheblich in Betracht kommt. Offenbar werden zur Entscheidung dieser Fragen die Versuche an total Farbenblinden viel geeigneter sein, als die an Farbentüchtigen, weil bei diesen die Benutzung stärkerer Lichter wegen der Einmischung des trichromatischen Apparates vermieden werden mufs.

Schliefslich seien hier noch einige Worte über die Adaptation der Stäbchen gestattet. Wenn einmal angenommen wird, dafs die Zersetzung des Sehpurpurs mit der Erregung verknüpft ist, so wird man sich wohl kaum der weiteren Annahme verschliefsen können, dafs der thatsächlich festgestellte starke Wechsel des Purpurreichtums auch mit dem Wechsel der Erregbarkeit, der Hell- und Dunkeladaptation in Zusammenhang zu bringen sei. Ich darf aber wohl, um Mifsverständnisse zu vermeiden, betonen, dafs ich keineswegs geneigt bin, die Adaptation hierauf ganz ausschliefslich zurückzuführen. Vielmehr wird erstlich einmal ohne Zweifel auch an die Wanderung des Pigmentes zu denken sein. Dafs diese im Sinne einer Anpassung des Auges an verschiedene Lichtstärken wirksam sei, ist zuerst von Exner[1] für die facettierten Augen gezeigt worden. Die Vermutung, dafs es sich für das Wirbeltierauge ebenso verhält, ist eine naheliegende, und sie hat sich, wie mir, gewifs auch vielen anderen Forschern aufgedrängt.[2]

Daneben erscheint aber selbstverständlich auch noch die Beteiligung irgend welcher ganz anderer Faktoren möglich. Und noch weniger wäre man zur Zeit zu der Folgerung berechtigt, dafs die Umstimmungen des trichromatischen Apparates notwendig und ausschliefslich auf dem wechselnden Vorrat

---

[1] Exner, Durch Licht bedingte Verschiebungen des Pigmentes im Insektenauge und deren physiologische Bedeutung. *Sitzungsber. der Wien. Akad.* Math.-naturw. Kl. XCVIII. Abt. 3. 1889.

[2] Ausgesprochen finde ich sie bei E. Fick. *Vierteljahrsschr. d. Naturf. Gesellsch. in Zürich.* XL. S. 2. 1895.

der in den Zapfen angehäuften lichtempfindlichen Stoffe beruhen müsse.

Überhaupt versteht es sich ja von selbst, dafs, indem wir uns entschliefsen, die Stäbchen als einen monochromatischen (farbenblinden) von den trichromatischen einigermafsen unabhängigen Apparat anzusehen, durch die Gewinnung dieser Anschauung unsere Kenntnisse über die Einrichtung des trichromatischen Apparates direkt nicht gefördert werden. Nur insofern kann hiervon die Rede sein, als eine abweichende Deutung gewisser Thatsachen bisher ganz bestimmte Folgerungen bezüglich des trichromatischen Sehapparates zu gestatten schien (so z. B. die Unabhängigkeit der Weifs-Ermüdung von den Umstimmungen bezüglich der Farben; ferner die angenommene Übereinstimmung des beim total Farbenblinden vorhandenen Sehapparates mit der schwarzweifsen Sehsubstanz des Trichromaten) und diese nunmehr wieder in Frage gestellt, wenigstens von dieser Seite nicht mehr gestützt sind. Die so viel diskutierten Fragen betr. der Einrichtung des trichromatischen Apparates will ich daher an dieser Stelle nicht berühren. Um jedoch Mifsverständnissen vorzubeugen, möchte ich noch ausdrücklich betonen, dafs, wenn ich schlechtweg von dem trichromatischen Zapfenapparat gesprochen habe, ich damit nicht die Behauptung aufstellen will, dafs Einrichtung und Funktion desselben an allen Stellen der Netzhaut die gleichen seien. Freilich erscheint es ja auf den ersten Blick sehr nahe liegend, die Farbenblindheit der Netzhautperipherie auf die Einmengung der Stäbchen unter die Zapfen zu beziehen. Bekannte Thatsachen lassen es aber zunächst fraglich erscheinen, ob dies Erklärungsprinzip ausreicht. Da die Zapfen der Peripherie sich bezüglich ihres Baues und ihrer Leitungsverhältnisse von denen der Fovea wesentlich unterscheiden, und da überdies die Funktion selbstverständlich nicht blofs von den Endapparaten, sondern auch von der Beschaffenheit cerebraler Einrichtungen abhängt, so hat der Gedanke einer Abänderung des Zapfenapparates gegen die Peripherie natürlich nichts Befremdendes. Darüber, ob eine solche anzunehmen ist oder nicht, soll an dieser Stelle kein Urteil abgegeben werden.

Nachtrag.

Seit der Einsendung des Manuskriptes obiger Abhandlung (deren Drucklegung sehr verzögert worden ist) sind zwei andere, unseren Gegenstand betreffende Aufsätze von HERING[1] erschienen, von denen insbesondere der letztere mich noch zu einigen Bemerkungen veranlaſst. H. weist hier darauf hin (wie auch schon GAD), daſs nach den Angaben der Histologen ein erheblich gröſserer Netzhautbezirk als die Fovea centralis, wohl der ganze gelbe Fleck, stäbchenfrei sei. Es ist gewiſs richtig, daſs KÖNIGS Annahme von der Blaublindheit der Zapfen im Hinblick auf diesen Umstand in einen noch deutlicheren Widerspruch mit leicht zu konstatierenden Thatsachen gerät, als wenn es sich nur um den kleinen Bezirk der Fovea handelt. Dagegen kann ich nicht finden, daſs sich für die von mir vertretene Anschauung von der Funktion der Stäbchen hier Schwierigkeiten ergeben. Allerdings habe ich in meiner ersten Mitteilung auch von dem Fehlen der Dunkelfunktion an der Fovea gesprochen, ohne aber eine Messung des betreffenden Bezirkes (die selbstverständlich recht schwierig ist) vorgenommen zu haben und ohne also seine genaue Kongruenz mit der Fovea behaupten zu können oder zu wollen.

Thatsächlich fehlt die Dunkelfunktion in einem zentralen Bezirke, der, für mich wenigstens, erheblich gröſser ist, als die Fovea. Wenn ich bei dunkeladaptiertem Auge einen kleinen Lichtpunkt fixiere und durch Annäherung eines peripher noch gut sichtbaren kleinen Objektes die Grenze des Verschwindens bestimme, so finde ich diese bei 2—3° Abstand vom Zentrum, etwas verschieden, je nach der diesem Objekte gegebenen Lichtstärke. Schwieriger ist es, isoliert betrachtete kreisrunde Felder zum vollständigen Verschwinden zu bringen; doch

[1] *Arch. f. d. ges. Physiol.* Bd. 60. S. 519 u. Bd. 61. S. 106.

gelingt mir dies bei lichtschwachen Objekten noch sehr deutlich bei Feldgröfsen, welche die der Fovea erheblich überschreiten, etwa bis zu 3°; hier ist ein genau zentrales Fixieren ohne eine dort befindliche Marke naturgemäfs sehr schwierig. Nach der funktionellen Beobachtung würde ich danach dem stäbchenfreien Bezirke eine Ausdehnung von etwa 4°, nach jeder Seite je 2°, vom Zentrum zuschreiben. In meinen oben erwähnten Beobachtungen erstrekte sich das betrachtete Feld von 2 bis 3,5 und 2,5 bis 4,3° vom Zentrum. Herr Dr. NAGEL beobachtete mit einem Felde, das sich von 3 bis 6° Abstand vom Zentrum erstreckte.

Was andererseits die Angaben der Histologen angeht, so wird aus der bei den meisten sich findenden Konstatierung, dafs „am gelben Fleck die Stäbchen fehlen“, ja mit Sicherheit zu entnehmen sein, dafs der stäbchenfreie Bezirk über die Fovea erheblich hinausreicht; um wieviel aber, läfst sich doch wohl kaum mit Sicherheit sagen, da nur KÖLLIKER ausdrücklich den ganzen gelben Fleck für stäbchenfrei erklärt, eine Angabe, die mit Rücksicht auf die sehr wechselnde und nur ungenau zu bestimmende Ausdehnung der Macula nicht für genaue zahlenmäfsige Angaben verwertbar erscheint. KÜHNE sagt von dem einen der von ihm untersuchten Menschenaugen,[1] er könne auf das Bestimmteste versichern, „dafs die Stäbchenaufsenglieder der äufseren noch gelben und vollends der nächstäufseren, vorher kaum als gefärbt erkennbaren Regionen rot erschienen, als .... Falten auf der Fläche erschienen, an denen viele solche Stäbchen übereinander geschichtet lagen“. Bezüglich des anderen, an dem der stäbchenfreie Bezirk sich über die Macula hinaus erstreckte, sagt KÜHNE, dafs ihn die sehr geringe Ausdehnung der gelben Färbung überrascht habe; er betont überdies, „dafs hier der Abstand der ersten Stäbchenkränze, vom Zentrum der Fovea gerechnet, gewifs das Doppelte, wenn nicht mehr betrug, als an der anderen Retina“ (a. a. O. S. 113). Berücksichtigt man das alles, so wird man sagen dürfen, dafs eine Annahme, die dazu führt, den stäbchenfreien Bezirk auf etwa 4° Durchmesser zu veranschlagen, sich mit anatomischen Thatsachen nicht in Widerspruch setzt.

---

[1] *Untersuchungen aus dem Physiologischen Institut zu Heidelberg.* I. S. 107.

In Bezug auf die von König und seinen Mitarbeitern angestellten Versuche sagt Hering, es sei das Purkinjesche Phänomen beobachtet worden mit einer Netzhautpartie, die stäbchenfrei sei, also nach der Anschauung Königs selbst (wie übrigens auch meiner) das Phänomen nicht zeigen könne. Da ich mich auf jene Versuche oben auch bezogen und sie in meinem Sinne interpretiert habe, so wird es angezeigt sein, anzugeben, aus welchem Grunde mir das unzutreffend erscheint. Um ein Gesichtsfeld von 3,5° ganz auf stäbchenfreien Stellen abzubilden, ist schon eine fast genaue zentrale Fixation erforderlich. Nun ist in jenen Beobachtungen, soweit ich wenigstens finden kann, niemals besonders Sorge getragen worden, den Mittelpunkt des Feldes zu fixieren. Es lag dazu auch nach den damaligen Anschauungen Königs und seiner Mitarbeiter gar kein Grund vor. Es ist also ganz zweifellos immer in gewöhnlicher Weise mit wanderndem Blick beobachtet worden, wobei vielfältigst im Netzhautzentrum nicht nur Randteile des Feldes, sondern auch aufserhalb desselben gelegene Punkte abgebildet wurden. Je mehr, bei abnehmender Lichtstärke, das Feld zentral unsicher und schwer sichtbar wurde, um so mehr wird diese Art der Betrachtung bevorzugt worden sein, ohne dafs die auf diesen Punkt noch nicht aufmerksam gewordenen Beobachter dies besonders bemerkt hätten. Dafs aus diesem Grunde die Beobachtungen nicht einwurfsfrei erscheinen, habe ich oben schon gesagt; dafs sie aber gleichwohl ganz regelmäfsig in dem Sinne ausfallen, dafs bei abnehmender Lichtstärke die Stäbchenvalenzen immer mehr in Betracht kommen, ist vollkommen begreiflich, und namentlich scheint mir die betreffende Beobachtung der Dichromaten, welche nicht auf das Maculapigment zurückgeführt werden kann, beachtenswert.

Übrigens könnte es allerdings im Hinblick auf die individuell wechselnde Gröfse der stäbchenfreien Bezirke und die starke Unsicherheit stark exzentrischer Beobachtung nicht gar zu sehr überraschen, wenn manche Trichromaten das Ungültigwerden der Hellgleichungen für geringes Licht und Dunkeladaptation nicht konstatieren könnten Es ist um so mehr zu wünschen, dafs Hering Gelegenheit nähme, die Hellgleichung eines Dichromaten auf die Übereinstimmung der „Weifsvalenz“ zu prüfen.

Endlich noch eine Bemerkung: Hering sagt in der ersten der beiden oben erwähnten Abhandlungen, es hätten König und ich „neuerdings unsere frühere Ansicht und sogar die Young-Helmholtzsche Farbentheorie teilweise aufgegeben und eine Erklärung des Purkinjeschen Phänomens versucht, welche an die von ihm (Hering) entwickelte Lehre von den weifsen Valenzen der farbigen Lichter anknüpft."

Hierzu möchte ich bemerken, dafs, soweit ich in Frage komme, ein teilweises Aufgeben der Helmholtzschen Theorie und, wenn man will, auch eine gewisse Annäherung an die Anschauungen Herings, doch wohl vor allem darin gefunden werden mufs, dafs ich von jeher die Helmholtzschen Komponenten nur als den zutreffenden Ausdruck einer peripheren Gliederung unseres Sehapparates, nicht aber für die Vorgänge in der Hirnrinde gehalten habe. Dieser eingeschränkte Sinn, in dem ich die Drei-Komponenten-Theorie stets vertreten habe, ist von mir oft genug und auch schon in meinen ersten Arbeiten (1882) betont worden, und ich hatte nur zuweilen Anlafs, zu bedauern, dafs von gegnerischer Seite hiervon nicht mehr Notiz genommen wurde. Die Anschauung, die ich mir in neuerer Zeit bezüglich der Stäbchenfunktion gebildet habe, stellt gegenüber meiner älteren eine Ergänzung dar; da dieselbe aber die Anschauungen von der Einrichtung des trichromatischen Apparates ganz unberührt läfst, so vermag ich darin eine weitere Entfernung von den Helmholtzschen oder eine Annäherung an die Heringschen Vorstellungen nicht zu erblicken. — Den Wert jener Beobachtungen, in denen Hering die Weifsvalenzen zu bestimmen meint, habe ich keinen Augenblick verkannt; nur bin ich überzeugt, dafs das, was hier bestimmt wird, etwas anderes ist, als das, was Hering mit dem Worte Weifsvalenz bezeichnet, nämlich Stäbchenvalenz.



(Aus dem physiologischen Institut zu Freiburg i. B.)

Über den Einfluſs von Lichtstärke und Adaptation auf das Sehen des Dichromaten (Grünblinden).

Von

J. v. Kries und W. Nagel.

(Mit 3 Figuren im Text.)

Seit langer Zeit ist bekannt, daſs für die Dichromaten zu jedem homogenen Lichte eine gleich erscheinende Mischung zweier bestimmter Lichter, eines lang- und eines kurzwelligen gefunden werden kann. In systematischer Weise ist dies zuletzt in den Beobachtungen der Mitarbeiter Königs dargelegt worden, bei welchen derart ermittelt wurde, welche Mengen gelbroten Lichtes (645 $\mu\mu$) und blauen Lichtes (460, resp. 435 $\mu\mu$), zusammengefügt, dem Lichte beliebiger Spektralteile gleich erscheinen. Schon sehr bald nach der Gewinnung der ersten Resultate dieser Art wurde von König auch mitgeteilt, daſs die Gleichungen dieser Art von der absoluten Intensität der sämtlichen angewandten Lichter nicht unabhängig seien, daſs also z. B. eine für hohe Lichtstärken gültig gefundene Gleichung bei gleichmäſsiger Abschwächung sämtlicher Lichter unrichtig werde. Da das sog. Newtonsche Farbenmischungsgesetz die Unabhängigkeit der Mischungsgleichungen von der absoluten Intensität implicite behauptet, so wurde die erwähnte Thatsache als „Abweichung vom Newtonschen Farbenmischungsgesetze" bezeichnet. Eine Anzahl analoger Erscheinungen ist alsdann auch mit Bezug auf die Mischungsgleichungen des Trichromaten (Farbentüchtigen) beschrieben worden.

Das ganze Erscheinungsgebiet hat neuerdings ein besonders hohes theoretisches Interesse gewonnen wegen seiner Beziehungen zu der über die Funktion der Stäbchen aufgestellten Theorien,

wie dies der eine von uns im allgemeinen bereits dargelegt hat.[1] Die dort entwickelte Annahme bestand, um die Hauptsache hier sogleich kurz anzudeuten, darin, dafs zwei (einfache oder zusammengesetzte) Lichter hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Zapfenapparat übereinstimmen können (worauf im wesentlichen ihr Gleicherscheinen bei hoher Intensität beruht), ohne dafs darum ihre Wirkungen auf den Stäbchenapparat die gleichen zu sein brauchten, was sich dann bei der Abschwächung und bei Dunkeladaptierung des Auges bemerkbar macht.

Es konnte damals zum Teil auf die Ergebnisse der unter Königs Leitung entstandenen Arbeiten Bezug genommen, zum Teil auch hinzugefügt werden, dafs qualitativ auch gewisse neuerdings von dem anderen von uns (N.) angestellte Versuche in vollkommener Übereinstimmung mit jenen sich befänden. Eine genauere und insbesonders auch quantitative Bearbeitung des ganzen Gebietes erschien aber doch sehr wünschenswert. Denn erstlich konnte bei einem noch wenig behandelten Gegenstande selbst die Gewinnung ganz übereinstimmender Ergebnisse von einem anderen Beobachter und unter vielfach anderen Bedingungen von Wert sein. Abgesehen hiervon erschienen aber die Beobachtungen von König und seinen Mitarbeitern in der That mit gewissen Mängeln behaftet, welche zu vermeiden oder wenigstens zu berücksichtigen angezeigt und möglich war. Der erste betrifft den Punkt, welchen Hering mit Recht betont (allerdings in seiner Bedeutung wohl überschätzt) hat, dafs bei König zu grofse Gesichtsfelder angewandt wurden und infolgedessen die Lichtabsorption im Pigment der Macula lutea einen unkontrolierbaren Einflufs auf die Gleichungen gewinnen konnte.

Der andere war der, dafs den Verhältnissen der Adaptation nicht genügend Rechnung getragen worden ist. Allerdings sind wohl zweifellos die Beobachtungen über die Helligkeitsverteilung bei geringsten Lichtstärken mit guter Dunkeladaptation ausgeführt worden, wie sich diese im Dunkelzimmer und bei Beobachtung nur sehr lichtschwacher Felder von selbst entwickelt. Dagegen kann man über den Adaptationszustand, mit dem die Beobachtungen bei gröfseren Lichtstärken ausgeführt wurden, einigermafsen im Zweifel sein.

Aus diesem Grunde unternahm der eine von uns (N.), der

---

[1] *Zeitschr. f. Psychol.* IX. S. 89 f.

Dichromat ist, und zwar der Gruppe der Grünblinden im HELMHOLTZschen Sinne angehört, unter Mitwirkung und Beratung des anderen, die betreffenden Beobachtungen in systematischer und messender Weise auszuführen. Über die Ergebnisse soll im folgenden berichtet werden Vorausgeschickt sei noch, daſs die Beobachtungen durchgängig mit einem von der Firma Schmidt & Hänsch gebauten Farbenmischungsapparate der von HELMHOLTZ zuerst angegebenen, seitdem von KÖNIG mehrfach modifizierten Art angestellt wurden. Bekanntlich gestattet der Apparat, jedes der beiden aneinanderstoſsenden Felder mit einem homogenen oder auch mit der Mischung zweier homogener Lichter zu erleuchten. Eine Reihe speziellerer Bemerkungen über den Apparat, seine Benutzung, die Berechnungen etc. sind in dem den Schluſs dieser Abhandlung bildenden Abschnitt VI zusammengestellt.

Die verschiedenen spektralen Lichter sind im Folgenden entweder nach ihrer Wellenlänge, in $\mu\mu$, oder aber auch nach ihrem spektralen Ort, in Teilstrichen der Skala des Kollimators angegeben; die letzteren Zahlen sind von dem Ort des Lithiumlichtes (670,8 $\mu\mu$) als Nullpunkt aus gerechnet und in viereckige Klammern eingeschlossen. Die diesen spektralen Orten entsprechenden Wellenlängen sind aus der im Anhange gegebenen Tabelle ersichtlich; so ist also z. B. [6] ein Licht, dessen spektraler Ort um 6 Teilstriche von dem Orte des Lithiumlichtes entfernt ist; seine Wellenlänge = 591 $\mu\mu$. Und zwar beziehen sich diese Angaben alle auf das Spektrum des Kollimators II, welches in seiner ganzen Ausdehnung durchuntersucht wurde, während der Kollimator I die feststehenden Vergleichslichter von konstanter Wellenlänge zu liefern hatte.

I.

Hellgleichungen.

Die Aufgabe einer systematischen Darstellung der für einen Dichromåten geltenden Mischungsgleichungen kann, wie angedeutet wurde, unter mancherlei verschiedenen Modalitäten gestellt werden, welche sich auf die Stärke der benutzten Lichter, auf den Adaptationszustand des Auges und auch auf die bei der Beobachtung funktionierende Netzhautpartie beziehen. Lassen wir uns bei der Wahl aus der groſsen Zahl sich so

ergebender Möglichkeiten von der theoretischen Erwägung leiten, so wird es sich empfehlen, zunächst einen Beobachtungsmodus einzuhalten, bei welchem möglichst rein und scharf die Lichtwirkungen auf den Zapfenapparat zum Ausdruck kommen. Man kann übrigens bemerken, daſs es sich dabei um eine auch abgesehen von der Theorie wohl charakterisierte Art des Sehens handelt, nämlich um das Sehen bei bedeutenden Lichtstärken und mit helladaptiertem Auge, überdies mit wesentlicher Bevorzugung des Netzhautzentrums. Eine Gleichung, welche besagt, daſs unter diesen Umständen zwei Lichter gleich aussehen, wollen wir eine Hellgleichung nennen, und die beiden Lichter, welche in dieser Beziehung stehen, etwa ein homogenes und eine Mischung aus Rot und Blau, mögen helläquivalent heiſsen.

Zur Gewinnung der Hellgleichungen waren einerseits möglichst hohe Lichtstärken anzuwenden, und wir wählten sie so hoch, als der Apparat sie mit den Triplexbrennern zu erzielen gestattete, ohne die namentlich bezüglich der Reinheit der Spektren gesetzten Grenzen zu überschreiten. Es lieſs sich indessen vermuten, und die Erfahrung bestätigte es, daſs hohe Lichtstärken, wenigstens innerhalb der uns erreichbaren Grenzen, doch nicht ausreichen, um die Stäbchenfunktion ganz zurücktreten zu lassen, und daſs die andere Bedingung, die der Helladaptation, nicht auſser acht zu lassen ist. Wir haben daher die Beobachtungen, von der seitherigen Übung abweichend, im nicht verdunkelten Zimmer angestellt, nicht ohne einige Sorge zunächst, daſs das in den zwar leidlich, aber doch nicht absolut lichtdicht abgeschlossenen Apparat eindringende diffuse Licht erhebliche Versuchsfehler bedingen möchte. Indessen lieſs sich bald erkennen, daſs bei unserer Versuchsanordnung die hierdurch bedingten Ungenauigkeiten nicht merklich in Betracht kommen. In der That ist auch das diffuse Licht, da in einem Zimmer mit geschwärzten Wänden gearbeitet wurde, nicht sehr erheblich, wird also namentlich bei den ziemlich starken Erleuchtungen der Felder bei den Hellgleichungen nicht merklich stören können. Wir haben daher diese Verfahrungsweise für die Gewinnung von Hellgleichungen stets festgehalten.

Es erwies sich sogar die Erhaltung einer möglichst guten Helladaptation für die Gewinnung konstanter Resultate nicht

ganz unwichtig, und es war notwendig, diesem Punkte besondere Aufmerksamkeit zuzuwenden, da das zu betrachtende Feld hier auf einem ausgedehnten schwarzen Grunde erscheint und somit schon bei längerer Beobachtung ein gewisser Grad von Dunkeladaptation einzutreten pflegt. Der Beobachter muſste daher darauf halten, nach Herstellung einer Gleichung immer einige Zeit zum Fenster hinauszuschauen und sodann die Gleichung nochmals auf ihre Gültigkeit zu prüfen. Da die Hellgleichungen für die Stelle des deutlichsten Sehens gültig hergestellt werden sollten, so wurde ein ziemlich kleines Feld, etwas kleiner als 2⁰ Durchmesser, benutzt; die Gleichungen werden also, da das Feld auch möglichst direkt fixiert werden sollte, durch die Absorption der kurzwelligen Lichter im Maculapigment beeinfluſst sein.[1]

Was nun die speziellere Gestaltung der Hellgleichungen anlangt, so war der gegebene Modus der, für eine Anzahl homogener Lichter von einem bis zum anderen Ende des Spektrums helläquivalente Gemische aus einem lang- und einem kurzwelligen Lichte aufzusuchen. Wir wählten für das Gemisch als langwelligen Bestandteil ein Rot (Gelbrot) von der Wellenlänge 645 $\mu\mu$, als kurzwelligen ein Blau 460,8 $\mu\mu$. Es war demgemäſs der eine, das homogene Licht liefernde, Kollimator (II) successive auf eine Reihe verschiedener Punkte des Spektrums einzustellen, während der andere, das Gemisch liefernde, feststand. Auf diese Weise wurden 22 Punkte des

---

[1] Man wird vielleicht einen Widerspruch darin finden, daſs hier auf die Helladaptation Wert gelegt wird, während später an der Behauptung festgehalten wird, daſs für kleine zentrale Bezirke die Gleichungen vom Adaptationszustand unabhängig seien. Dies ist jedoch keineswegs eine Inkonsequenz. Wenn bei mäſsig dunkeladaptiertem Auge beobachtet wird, so gewinnen selbst bei Feldern von mäſsiger Gröſse (weniger als 2⁰), wie sie hier benutzt wurden, die Nachbarteile des Zentrums einen bedeutenden Einfluſs auf die Gleichungen, sofern man nicht ganz besonders Sorge trägt, dies durch strenge Fixation auszuschlieſsen. Prinzipiell also wäre es freilich möglich, Zapfengleichungen auch mit dunkeladaptiertem Ange zu erhalten; aber die dazu erforderliche Vermeidung der Blickschwankungen würde den Versuch nicht nur erschweren, sondern auch die Genauigkeit vermindern. Bei gut helladaptiertem Auge dagegen unterscheiden sich die Gleichungen des Zentrums von denen der nächsten Nachbarteile nur wenig, und so kann eine Hellgleichung auch ohne Einhaltung ganz strenger Fixation gewonnen werden.

Spektrums bestimmt. Das Ergebnis einer derartigen Bestimmungsreihe präsentiert sich in der Form, daſs für jedes homogene Licht die in dem äquivalenten Gemisch erforderlichen Rot- und Blaumengen anzugeben sind oder, wie man sagen kann, die Verteilung der Rot- und der Blauwerte über das Spektrum hin. Zur richtigen Beurteilung der Bedeutung einer solchen Darstellung sei hier nur noch hervorgehoben, daſs die Einheiten des Rot- und Blauwertes hier als willkürlich gewählte zu betrachten sind.

Das System der erhaltenen Hellgleichungen ist nun in Tabelle I (S. 8) enthalten. Dabei ist im ersten Stabe der spektrale Ort und die Wellenlänge des betreffenden homogenen Lichtes angegeben, der zweite Stab enthält die Rot-, der dritte die Blauwerte.

Da aus den im Anhang dargelegten Gründen die Ergebnisse einer einzelnen, besonders gut übereinstimmenden Versuchsreihe in sich wohl für genauer zu halten sind, als die Ergebnisse zahlreicher, zum Teil weniger guter Reihen, so ist in Tabelle I das System der Hellgleichungen zunächst auf Grund einer derartigen Reihe angeben, wobei jede angeführte Zahl den Mittelwert aus nur drei Einstellungen, die unter einander durchgängig gut übereinstimmten, darstellt. Doch sind, teils der Vollständigkeit wegen, teils auch um eine Kontrolle zu ermöglichen, in Parenthese und kleinem Druck diejenigen Zahlen beigefügt, welche als das Gesamtmittel aller gemachten (8) Einstellungen sich berechnen.[1]

In übersichtlicherer Weise bringt die graphische Darstellung die Ergebnisse zum Ausdruck. Der Figur 1 sind die Mittelwerte der einen, auch in der Tabelle bevorzugten Reihe zu Grunde gelegt.[2] Die Abscissen geben die Punkte des Dispersionsspektrums in Teilstrichen der Kollimatorskala an, während durch die liegenden Zahlen die Wellenlängen bemerkt sind; die

---

[1] Die Bedeutung der im vierten Stabe hinzugefügten Bemerkungen, die hier zunächst nicht erörtert werden kann, findet sich im Anhang dargelegt.

[2] Eine unter Umständen deutlich bemerkbare Fehlerquelle stellt, wie oben schon erwähnt, eine zu geringe Helladaptation des Auges dar. Sie wirkt besonders in der Weise, daſs die grüngelben Lichter mit ihrer sehr hohen Stäbchenvalenz dadurch an Helligkeit gewinnen, wodurch einerseits eine Verstärkung des Rot erforderlich wird (also der Rotwert zu hoch erscheint), andererseits aber auch das gelbgrüne Licht an

Ordinaten der ausgezogenen Kurve geben die Werte des Rotanteils, die Ordinaten der gestrichelten Kurve die des Blauanteils. Eine Umrechnung der Kurven auf gleiche Areale, die für uns kein direktes Interesse hat, ist unterlassen worden, doch haben wir den demzufolge ganz beliebigen Mafsstab der Kurven so gewählt, dafs ein Vergleich mit den KÖNIGschen Kurven durch den Augenschein möglich ist. Es ist gerade ein Vergleich mit diesen, der bereits eine kurze Erörterung dieser Hellkurven für sich allein interessant macht.

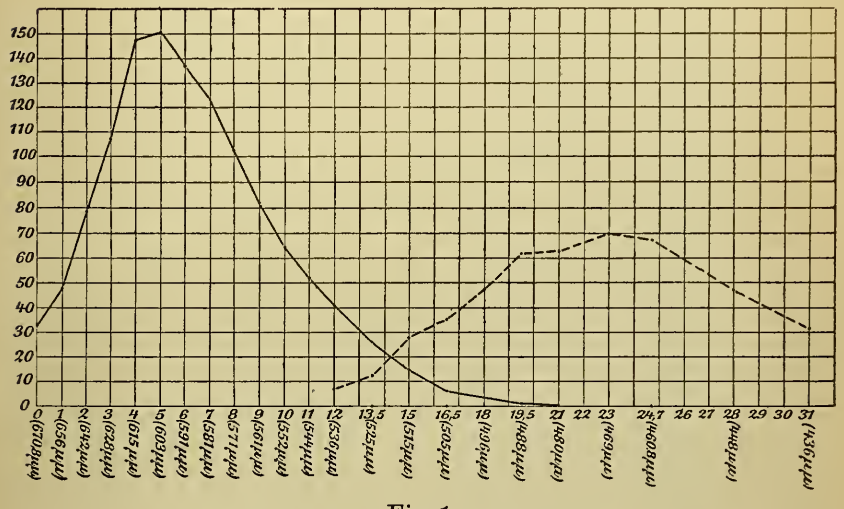


Fig. 1.

Verteilung der Rot- und der Blauwerte im Dispersionsspektrum des Gaslichtes.

Man wird bemerken, dafs gegenüber den KÖNIGschen Kurven hauptsächlich e i n Unterschied hervortritt. In unserer Kurve beginnt der Blauanteil überhaupt erst bei Teilstrich 12, entsprechend einer Wellenlänge 536, während er in den Kurven KÖNIGS sich viel weiter, bis 600 $\mu\mu$, und noch weiter mit merk-

---

Sättigung einbüfst, wodurch ein Blauzusatz im Gemisch erforderlich wird, der bei einer ganz korrekten Hellgleichung nicht verlangt wird. Hierin liegt der Grund, weshalb bei einigen Beobachtungen schon bei den Lichtern [10] und [11] kleine Blauzusätze in Gemische gegeben wurden, während bei guter Helladaptation zwischen diesem Licht und dem Rot (645) eine Gleichung ohne Sättigungsdifferenz sich herstellen liefs.

Tabelle I.

System der Hellgleichungen.

Spektraler Ort der homogenen Lichter ($Li_\alpha = 0$)	Rotwerte	Blauwerte	Angewandte Spaltweiten
0 (670,8 μμ)	33 (33)	—	Sp. I = 80
1 (656)	48 (51)	—	„
2 (642)	79 (81)	—	„
3 (628)	107 (114)	—	„
4 (615)	147 (134)	—	„
5 (603)	151 (138)	—	„
6 (591)	137 (134)	—	„
7 (581)	124 (122)	—	„
8 (571)	103 (102)	—	„
9 (561)	82 (78)	—	„
10 (552)	64 (69)	0 (2,8)	„
11 (544)	52 (52)	0 (4,8)	„
12 (536)	41 (38,5)	6,3 (9,7)	Sp. II = 100
13,5 (525)	26 (24,5)	12 (15,1)	„ „ = 100
15 (515)	15 (14,0)	28 (28,9)	„ „ = 150
16,5 (505)	7,7 (7,4)	36 (37,0)	„ „ = 150
18 (496)	3,7 (3,5)	48 (46,3)	„ „ = 200
19,5 (488)	1,6 (1,7)	62 (59)	„ „ = 200
21 (480)	0,9 (0,9)	64 (64)	„ „ = 200
23 (469)	0,3 (0,3)	70 (68)	„ „ = 300
24,7 (460,8)	Sp.	67 (62)	„ „ = 300
28 (448)	Sp.	47	Sp. I = 300
31 (436)	—	31	„ „ = 300

lichen Beträgen erstreckt. Dieser Punkt ist von einigem Interesse; die Differenz beruht in sehr deutlich ersichtlicher Weise auf dem Unterschiede des Verfahrens. Auf kleinen Feldern und bei guter Helladaptation, darüber lassen die in diesem Punkt mit besonderer Sorgfalt vielfach wiederholten Versuche keinen Zweifel bestehen, läſst sich zwischen Licht 550 $\mu\mu$ oder 544 $\mu\mu$ und 645 eine vollkommen zutreffende Gleichung gewinnen; ja selbst bei 536 (Teilstrich 10) ist die Sättigungsdifferenz noch so gering, daſs sie sich den Fehlergrenzen nähert. Zwischen einem rotgelben Lichte von 645 $\mu\mu$ und einem gelbgrünen von 550 $\mu\mu$ sind aber die Differenzen der Stäbchenvalenzen sehr beträchtlich. Sobald man also mit etwas gröſseren Feldern und gar noch mit mäſsig dunkeladaptiertem Auge arbeitet, ist es unmöglich, Gleichungen zwischen 645 $\mu\mu$ und 550 $\mu\mu$ zu erhalten; das letztere Licht erscheint zu ungesättigt, und es muſs, um Gleichheit zu erhalten, dem Rot eine Blauzumischung gegeben werden. Die Sache liegt also folgendermaſsen. Die von König gefundenen Kurvenreihen lassen erkennen, wie sich die Mischungsverhältnisse bei einer mehr oder weniger stark hervortretenden Funktion der Stäbchen gestalten; sein Verfahren reicht aber nicht aus, um eine Darstellung zu gewinnen, welche die Verhältnisse des Zapfenapparates ganz isoliert zum Ausdruck bringt. In dem Sinne unserer theoretischen Auffassung hat also König dem thatsächlich zu erreichenden Extrem sich nur angenähert, ohne es ganz zu erreichen; auch seine der höchsten Lichtstärke entsprechenden Kurven sind schon gemischter Natur, bezeichnen einen Zustand, bei dem die Stäbchen bereits merklich in Funktion sind.

Mehrere Dinge klären sich hierdurch in befriedigender Weise auf. Ebbinghaus[1] hat gegenüber theoretischen Betrachtungen Königs darauf hingewiesen, daſs die Kurve der Blauwerte für den Trichromaten einer- und den Dichromaten andererseits nicht, wie nach König zu erwarten sei, übereinstimmend, sondern in der Strecke von 536 bis 590 $\mu\mu$ stark verschieden verlaufen. Der Grund hierfür liegt nun in der Hauptsache darin, daſs ein Auftreten von Blauwerten beim Dichromaten überhaupt nur auf Einmischung der Stäbchenfunktion, also auf einem nach Adaptation, Feldgröſse etc. ungemein variablen

[1] *Zeitschr. f. Psychol.* V. S. 160.

Momente beruht. Der wahre Wert der Blaukurve für helladaptiertes Auge und kleines Feld, d. h. für ausschliefsliche Zapfenfunktion, ist bis mindetens 550 $\mu\mu$ noch nahezu Null, wie eben daraus hervorgeht, dafs der Dichromat zwischen Lichtern von 670 $\mu\mu$ einerseits und solchen bis etwa 549 Gleichungen ohne Sättigungsdifferenz herstellen kann. Und für den Trichromaten liegt die Sache ganz ebenso; denn er kann aus Lithiumrot und einem Grüngelb (bis 550 $\mu\mu$) Mischungen herstellen, die homogenem Gelb oder Orange ohne merkbare Sättigungsdifferenz gleich aussehen, sofern mit helladaptiertem Auge und kleinen Feldern untersucht wird. Der wahre Wert der Blaukurve ist also in beiden Fällen beim Farbentüchtigen wie beim Farbenblinden, wenn nicht absolut gleich Null, jedenfalls von so minimalem Betrage, dafs er sich einer messenden Feststellung entzieht.

Wenn man übrigens, wie König hervorhebt und wir bestätigen müssen, die ersten kleinen Beträge der Blaukurven nur mit grofser Unsicherheit bestimmen kann, so liegt dies nicht allein an dem eben erwähnten Umstande, sondern zum Teil auch an etwas anderem. Es wäre nämlich ein grofser Irrtum, zu glauben, dafs ein Rotwert und ein Blauwert, die in den hier gewählten Einheiten durch gleiche Zahlen bezeichnet sind, auch etwa gleiche Empfindungseffekte darstellen. Lassen sich auch diese (es handelt sich ja dabei um Helligkeitsvergleichung verschiedener Farben) stets nur unvollkommen vergleichen, so ist immerhin ein gewisser Vergleich doch möglich. Im Gasdispersionsspektrum ist nun für den Grünblinden, wie wir bei anderer Gelegenheit bestimmten, das Lithiumrot etwa so hell, wie die 8—12fache Menge blauen Lichtes von 480 $\mu\mu$. Danach läfst sich überschlagen, dafs in unseren Einheiten ein Teil Rot so hell erscheint, wie ca. 20 Teile Blau. Hiernach ist es ganz begreiflich, dafs z. B. gegenüber 30—35 Teilen Rot 6 oder 10 Teile Blau noch eine äufserst geringfügige Rolle spielen, während von Rot noch einige Zehntel gegenüber 60 Blau sich bestimmen lassen.

II.

Dunkelgleichungen.

Als zweite Aufgabe präsentierte sich nicht minder naturgemäfs diejenige, von der wir, theoretisch genommen, die Dar-

stellung der Wirkungen auf den Stäbchenapparat, der Stäbchenvalenzen erwarten können. Auch hier handelt es sich um die genauere Untersuchung einer bestimmten Art des Sehens, nämlich desjenigen bei geringer Lichtstärke und dunkeladaptiertem Auge, welches dadurch charakterisiert ist, dafs keine Farben unterschieden werden. Da wir diese Art des Sehens auch kurz als Dunkel- oder Dämmerungssehen bezeichnen können, so wollen wir die hier zu erhaltenden Gleichungen Dunkel- (Dämmerungs-) Gleichungen nennen; zwei Lichter, welche unter diesen Umständen gleich erscheinen, mögen dunkel- (dämmerungs-) äquivalent heifsen.

Auch für die systematische Darstellung der Dunkelgleichungen ist der genauere Modus unmittelbar gegeben. Da nämlich hier keine Farben unterschieden werden, somit zwischen je zwei beliebigen homogenen Lichtern eine Dunkelgleichung gewonnen werden kann, so ist nur erforderlich, für eine passend gewählte Reihe homogener Lichter, etwa die 22 auch vorher in den Hellgleichungen benutzten, Dämmerungsgleichungen mit irgend einem dauernd festgehaltenen Vergleichslichte herzustellen. Das Ergebnis einer derartigen Beobachtungsreihe präsentiert sich dann in der Form, dafs für jedes homogene Licht die der Einheit desselben äquivalente Menge des Vergleichslichtes angegeben wird. Was wir so erhalten, kann auch direkt als die Verteilung der Helligkeit im lichtschwachen (farblos gesehenen) Spektrum bezeichnet werden. Der Theorie nach hätten wir hierin eine Darstellung der „Stäbchenvalenzen“ der verschiedenen Lichter, der Abhängigkeit der Stäbchenvalenz von der Wellenlänge. Die hier gemachte Ermittelung ist aber, wie man bemerkt, genau die nämliche, wie sie Hering zur Bestimmung der „Weifsvalenzen“ anwendet, und die erhaltenen Werte sollten nach seiner Anschauung die Stärke der Wirkung auf die schwarzweifse Sehsubstanz, den Weifswert der verschiedenen Lichter ausdrücken. Da es notwendig ist, für diese Dinge kurze, der Theorie nicht vorgreifende Ausdrücke zu haben, so wollen wir die betreffenden Werte als die Dämmerungswerte oder Dämmerungsvalenzen der verschiedenen Lichter bezeichnen; der eventuell mifsvertändliche Ausdruck der Dunkelvalenz soll vermieden werden.

Zu bemerken wird noch sein, dafs, da beim Dämmerungssehen das Sehen mit dem Netzhautzentrum jedenfalls stark zurücktritt (wenn nicht ganz ausfällt), die Dunkelgleichungen

naturgemäſs auf eine weniger stark pigmentierte Netzhautstelle sich beziehen.

Hier geben wir wiederum in Tabelle II die Ergebnisse einer als vorzugsweise zuverlässig zu betrachtenden Bestimmungsreihe und in Figur 2 die graphische Darstellung, in welcher die Abscissen den Ort des betr. Lichtes im Dispersionsspektrum, die Ordinaten seinen Dämmerungswert bedeuten. Allerdings versteht sich von selbst, daſs die Dunkelgleichungen nicht mit derselben Sicherheit und Genauigkeit eingestellt werden können,

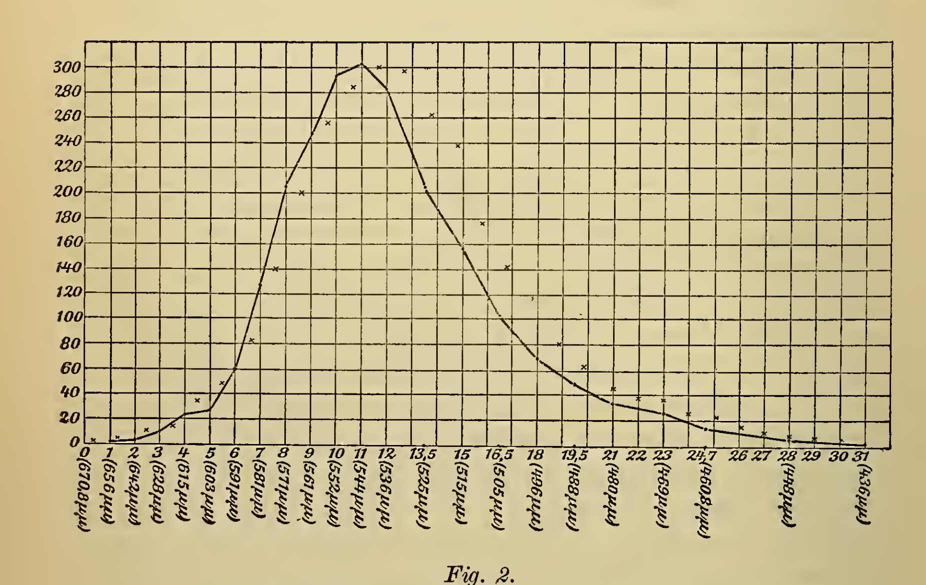


Fig. 2.

Verteilung der Dämmerungswerte im Dispersionsspektrum des Gaslichtes.

wie die Hellgleichungen. Bei den geringen Lichtstärken, auf die man sich beschränken muſs, ist der Vergleich stets ein relativ unsicherer. Es verdient bemerkt zu werden, daſs diese Schwierigkeit für die verschiedenen Lichter in sehr ungleichem Maſse besteht. Die Grenze nämlich, welche nicht überschritten werden darf, ist ja stets durch das Auftreten von Farbendifferenzen gegeben. Je höher nun, um es kurz auszudrücken, die Stäbchenvalenz im Vergleich zu der gesamten Zapfenvalenz ist, um so stärkere Stäbchenerregungen können noch in den Dunkelgleichungen verwendet werden, bei um so

gröfserer Helligkeit kann noch beobachtet werden. Am meisten ist dies in der brechbareren Hälfte des Spektrums der Fall. Bei den langwelligen Lichtern ist dagegen das Übergewicht der Stäbchen über die Zapfen ein so geringes, dafs wir uns, um nicht chromatische Erregung zu erhalten, auf äufserst geringe Lichtstärken beschränken, die Vergleichungen also bei sehr grofser Dunkelheit ausführen müssen. Können daher auch die Dämmerungswerte nur auf eine geringere Genauigkeit als die Hellgleichungen Anspruch machen, so zeigt doch schon die Gewinnung einer leidlich glatten Kurve, dafs die Fehler nicht von der Art sind, um die Möglichkeit der gewünschten Bestimmungen überhaupt in Frage zu stellen.

Tabelle II.

Dämmerungswerte der homogenen Lichter.

Spektraler Ort der homogenen Lichter $Li_{\alpha} = 0$	Dämmerungswert
0 (670.8 $\mu\mu$)	?
1 (656)	19.3
2 (642)	36
3 (628)	110
4 (615)	254
5 (60[illegible])	276
6 (591)	599
7 (582)	1276
8 (571)	2061
9 (561)	2477
10 (552)	2930
11 (544)	3027
12 (536)	2820
13.5 (525)	2055
15 (115)	1576
16.5 (505)	1015
18 (496)	697
19.5 (488)	486
21 (480)	318
23 (469)	263
24.7 (460.8)	146
28 (448)	46
31 (436)	17

Noch deutlicher geht dies aus dem Vergleich mit anderen ähnlichen Beobachtungsserien hervor, welche, mit der hier vorgelegten zwar nahe übereinstimmend, doch mit Deutlichkeit gewisse (für unsere Fragen übrigens nicht erhebliche) Differenzen zu erkennen gestatten. Als Illustration mögen die der graphischen Darstellung hinzugefügten Kreuze dienen, welche die mittleren Ergebnisse zahlreicher älterer Versuche darstellen.

Trotz der allgemeinen Übereinstimmung ist sehr wohl zu konstatieren, daſs hier die Kurve nach rechts hin etwas weniger stark abfällt, auch der Gipfel ein wenig weiter rechts liegt. Der Grund der Abweichung liegt vermutlich zum Teil darin, daſs diese Beobachtungen sich auf das Spektrum des anderen Kollimators beziehen, zum Teil mag er auch in anderen, im Anhange noch zu erörternden Umständen beruhen. Jedenfalls ist ersichtlich, daſs die Sicherheit der Beobachtung groſs genug ist, um derartige, sei es in der Beschaffenheit des untersuchten Lichtes, sei es in den Methoden der Abschwächung und quantitativen Ermittelung beruhende Unterschiede deutlich bemerkbar zu machen.

Ferner ist noch hier auf die älteren Bestimmungen gleicher Art, insbesondere die Königschen, hinzuweisen. Die sehr groſse Ähnlichkeit unserer Kurve z. B. mit der, ähnliche Beobachtungen darstellenden bei Tonn, der punktierten Kurve auf Tafel I, *diese Zeitschrift*, Bd. VI, springt auf den ersten Blick in die Augen. Ein speziellerer Vergleich lehrt, daſs das Maximum dort wohl ein wenig mehr gegen die kleinen Wellenlängen geschoben ist, als es in unserer Kurve liegt, und auch der Abfall gegen das brechbare Ende weniger steil ist. Worauf diese Differenz beruht, vermögen wir nicht mit Bestimmtheit zu sagen. Vielleicht beruht sie lediglich auf einer verschiedenen Beschaffenheit des hier und dort benutzten Leuchtgases. Vielleicht auch sind gerade hier die quantitativen Bestimmungen der sehr kleinen Lichtmengen, welche auf erhebliche Schwierigkeiten stoſsen, die Quelle von Differenzen geworden.[1]

Von Hering sind, wie ferner noch zu erwähnen ist, eine Anzahl ähnlicher Bestimmungen für Tageslicht ausgeführt worden.

---

[1] Vergl. über das von uns benutzte Verfahren den Anhang. Ob das von König angewendete (*Helmholtz-Festschr.* S. 326) ganz einwurfsfrei ist, scheint uns auch nicht ganz sicher.

König hat bereits gezeigt,[1] dafs diese mit der von ihm und seinen Mitarbeitern gefundenen Verteilung der Dämmerungshelligkeit nahe übereinstimmen, wenn man die Heringschen Werte auf das Spektrum des Gaslichtes umrechnet.

Eine Bemerkung ist endlich noch über das äufserste Rot hinzuzufügen. Es ist bekannt, dafs dieses stets, auch bei geringster Intensität und bester Dunkeladaptation, sogleich farbig gesehen wird. Die Bestimmung eines Dämmerungswertes erscheint daher hier zunächst unmöglich. Indessen konnte derselbe doch ermittelt werden, wenn die zentrale Fixation des Feldes vermieden und der Blick ein wenig abgewandt wurde. Alsdann konnte auch das Rot noch farblos gesehen und eine Dunkelgleichung mit ihm gewonnen werden. Die so herauskommenden Werte waren indessen so klein, dafs sie auch aus methodischen Gründen nicht mehr als sicher betrachtet werden können (rechnungsmäfsig = 3,9). Wir haben daher vorgezogen, in die betreffende Rubrik der Tabelle nur ein Fragezeichen zu setzen. Sicher ist, dafs der Dämmerungswert bei 670,8 noch sehr viel kleiner ist, als bei 656; absolut gleich Null wird er schwerlich sein; aber er ist zu klein, um eine messende Bestimmung mit einiger Sicherheit zu gestatten.

III.

Wir wenden uns nunmehr sogleich zu dem theoretisch am meisten interessierenden Punkte einer Vergleichung der Hellgleichungen mit den Ergebnissen der Dunkelbeobachtung. Was hier wesentlich in Frage kommt, ist dieses, ob diejenige Valenz, welche durch die Dunkelbeobachtungen bestimmt wird, der Dämmerungswert, wie wir es nannten, in den beiden Seiten der Hellgleichung, nämlich dem homogenen Licht einer- und der Blau-Rot-Mischung andererseits, übereinstimmt oder nicht. Nach den Heringschen Vorstellungen müssen zwei helläquivalente Lichter gleiche Weifswerte haben; wenn also die Dämmerungsvalenzen nichts anderes sind, als die Weifswerte, so müssen die helläquivalenten Lichterpaare bezüglich ihrer Dämmerungsvalenzen übereinstimmen.

Wie die Dinge in Wirklichkeit liegen, läfst sich aus dem bereits angeführten Beobachtungsmaterial ohne weiteres ent-

---

[1] *Helmholtz-Festschr.* S. 359.

nehmen. Da nämlich für die einzelnen homogenen Lichter einerseits der Dämmerungswert, andererseits die Rot- und Blaumengen bekannt sind, und wir auch wiederum die Dämmerungswerte dieses in der Hellgleichung figurierenden Blau und Rot kennen, so können wir leicht den Dämmerungswert eines homogenen Lichtes mit dem irgend eines helläquivalenten Gemisches vergleichen. Zu berücksichtigen ist hierbei nur, daſs wir beide Bestimmungen mit Hülfe anderer Spektra, welche die Vergleichslichter lieferten, ausgeführt und somit zunächst (wie oben schon erwähnt) in einem willkürlich gewählten Maſsstabe gewonnen haben. Hiervon macht uns eine einfache Rechnung unabhängig.

Bezeichnen wir nämlich die Rotwerte, Blauwerte und Dämmerungswerte mit r, b und d, wobei wir durch die zugefügten Indices die betr. Lichter bezeichnen, so daſs b_λ den Blauwert eines Lichtes von der Wellenlänge λ, $r_{[2]}$ den Rotwert des Lichtes [2] bedeuten würde, so würde zu einem mit der Einheit des Lichtes λ helläquivalenten Gemisch aus [2] und [24,7] erfordert werden die Menge $\frac{r_\lambda}{r_{[2]}}$ des Lichtes [2] und $\frac{b_\lambda}{b_{[24,7]}}$ des Lichtes [24,7] und zwar aus d e m s e l b e n S p e k t r u m. Die Dämmerungswerte dieser Beträge wären $\frac{r_\lambda}{r_{[2]}} \cdot d_{[2]}$ und $\frac{b_\lambda}{b_{[24,7]}} \cdot d_{[24,7]}$, und die Summe dieser Dämmerungswerte, der ganze Dämmerungswert des Gemisches, wäre zu vergleichen mit dem Dämmerungswert des homogenen Lichtes, mit d_λ.[1] Diese Rechnung haben wir durchgeführt für ein Gemisch, welches dem in den Hellbestimmungen benutzten fast genau gleich kommt, nämlich ein Gemisch aus [2] und [24,7]; das Rot ist ein wenig kurzwelliger (642 statt 645 $\mu\mu$), das Blau genau das nämliche (460,8 $\mu\mu$). Das Ergebnis dieser Rechnung führen wir in Tabelle III vor; dieselbe enthält in

[1] Wir haben vorgezogen, die Berechnung der Dämmerungswerte einer Hellgleichung hier sogleich allgemein anzugeben. Es führt natürlich zu demselben Ergebnis, wenn man sich die Aufgabe stellt, speziell die Dämmerungswerte der thatsächlich gefundenen helläquivalenten Gemische aus den dem anderen Kollimator angehörigen Lichtern 645 und 460,8 $\mu\mu$ unter Berücksichtigung der Helligkeitsverhältnisse der verschiedenen Spektra anzugeben. Die in unseren Tabellen aufgeführten Werte sind stets so berechnet, daſs sie die für die Spaltbreite 100 des untersuchten Spektrums erforderlichen Quanten der Vergleichslichter angeben. Finden wir also z. B. für die Rotkurve bei 645 den Wert r_{645},

der ersten Rubrik den spektralen Ort der homogenen Lichter, in der zweiten deren Dämmerungswert, in der dritten den Dämmerungswert des helläquivalenten Rotanteiles, in der vierten den des helläquivalenten Blauanteiles, in der fünften die Summe dieser beiden oder den Dämmerungswert des dem homogenen Licht helläquivalenten Blau-Rot-Gemisches, in der sechsten endlich das Verhältnis des Dämmerungswertes im homogenen Licht zu demjenigen der (helläquivalenten) Blau-Rot-Mischung. Wären, wie es von Hering und Hillebrand angenommen wurde, die bei der Dunkelbeobachtung zu bemerkenden Helligkeitswerte die Weifsvalenzen, so müfsten (abgesehen von dem sogleich noch zu erwähnenden Einflusse der Maculaabsorption) die Werte dieser letzten Spalte alle gleich 1 sein; denn die bei hoher Intensität gleich erscheinenden Lichter, das homogene einer- und die Blau-Rot-Mischung andererseits, müssen gleiche Weifsvalenzen haben. Unsere Zahlen belegen und illustrieren quantitativ, was (wie bei früherer Gelegenheit schon erwähnt wurde) qualitativ auch der direkte Versuch lehrt. Geht man von einer Hellgleichung durch proportionale Abschwächung aller Lichter und Adaptierung des Auges zu einer Vergleichung der Dämmerungswerte über, so findet man diese im allgemeinen ungleich, und zwar, wenn man z. B. Blau-Rot-Gemische der angegebenen Beschaffenheit mit homogenen Lichtern von 540 bis 490 $\mu\mu$ vergleicht, in sehr erheblichem, zum Teil geradezu kolossalem Grade. In der That sieht man hier, dafs der Dämmerungswert des homogenen Lichtes denjenigen des helläquivalenten Gemisches um das hundertfache und mehr übertreffen kann.

Um für diese Verhältnisse eine möglichst anschauliche Darstellung zu haben, ist in Figur 3 (ausgezogen) die Kurve der Dämmerungsvalenzen aus Figur 2 wiederholt; aufserdem ist im

---

wir können ihn = 72 interpolieren, so heifst dies, dafs 72 Teile dieses von dem Kollimator I gelieferten Rots 100 Teilen des gleichen Lichtes aus dem untersuchten Spektrum (des Kollimators II) gleich sind. Das Helligkeitsverhältnis der beiden Rot ist also $\frac{100}{72}$. Demgemäfs ist auch der Dämmerungswert dieses Rots, den wir für den Augenblick d^1_{645} nennen wollen, nicht gleich d_{645}, sondern $= \frac{100}{72} \cdot d_{645}$. Weist nun die Hellgleichung für ein beliebiges Licht λ den Rotwert r_λ auf, so besagt dies, dafs für 100 Teile λ im Gemisch r_λ Teile des Lichtes 645 aus Kollimator I erfordert wurden. Der Dämmerungswert dieses Rotanteiles ergäbe sich also $= \frac{r_\lambda}{100} d^1_{645} = \frac{r_\lambda}{r_{645}}, d_{645}$ mit der obigen Formel übereinstimmend.

gleichen Mafsstabe die Dämmerungsvalenz des helläquivalenten Rot- und Blauanteiles eingezeichnet.[1] Um die Stäbchenvalenz eines homogenen Lichtes mit derjenigen der (bei Hellvergleichung) äquivalenten Blau-Rot-Mischung zu vergleichen,

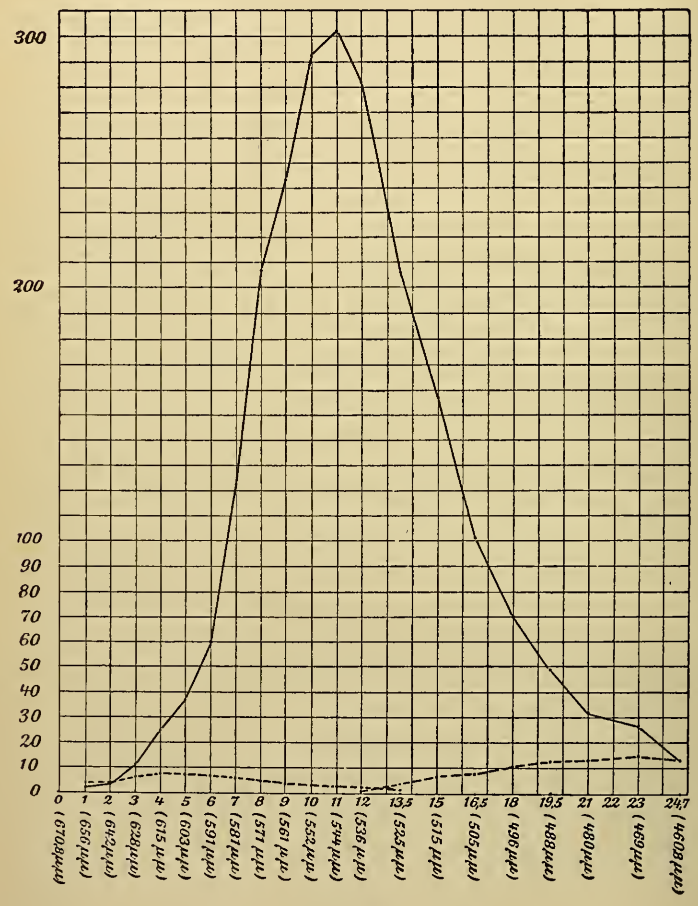


Fig. 3.

Dämmerungswerte der homogenen Lichter, — sowie der den homogenen Lichtern helläquivalenten Rot- und Blaumengen, ------- im Dispersionsspektrum des Gaslichtes.

---

[1] Die letzteren Kurven sind natürlich Wiederholungen der die Rot- und Blauwerte darstellenden Kurven in Figur 1, jedoch in einem veränderten, in Hinblick auf die hier zu machende Vergleichung bestimmt gewählten Mafsstabe; sie müssen die Kurve der Dämmerungswerte bei 642 $\mu\mu$ und bei 460,8 $\mu\mu$ schneiden. Die Kurven können hier nicht mehr

hat man dann nur nötig, die Ordinate der (ausgezogenen) Kurve der Dämmerungswerte mit der Summe der Ordinaten der beiden anderen Kurven zu vergleichen. In wie gewaltigem Betrage diese beiden Werte, die Dämmerungsvalenz des homogenen Lichtes und die Summe der Dämmerungsvalenzen der beiden

Tabelle III.

Vergleich der Dämmerungswerte der homogenen Lichter und der hell-äquivalenten Mischungen aus Rot (642) und Blau (460,8).

Spektraler Ort der homogenen Lichter. $Li_{\alpha} = 0$.	Dämmerungswert des homogenen Lichtes dh	Dämmerungswert des Rotanteiles im Gemisch	Dämmerungswert des Blauanteiles im Gemisch	Ganzer Dämmerungswert des Gemisches dg	Verhältnis des Dämmerungswertes des homogenen Lichtes zu dem des helläquivalent. Gemisches $\frac{dh}{dg}$
1 (656)	19,3	22,2	—	22,2	0,9
2 (642)	36	36	—	36	1
3 (628)	110	53	—	53	2,1
4 (615)	254	63	—	63	4,0
5 (603)	276	70	—	70	3,9
6 (591)	599	64	—	64	9,2
7 (581)	1276	57	—	57	22
8 (571)	2061	47	—	47	44
9 (561)	2477	38	—	38	65
10 (552)	2930	30	—	30	98
11 (544)	3027	24	—	24	126
12 (536)	2820	19	14	33	85
13,5 (525)	2055	12	26	38	54
15 (515)	1576	7,1	61	68	23
16,5 (505)	1015	3,6	78	82	12
18 (496)	697	1,7	104	106	6,6
19,5 (488)	486	0,8	134	135	3,6
21 (480)	318	0,4	139	139	2,3
23 (469)	263	0,1	152	152	1,7
24,7 (460,8)	146	—	146	146	1,0
28 (448)	46	—	91	91	0,5
31 (436)	17	—	37	37	0,46

auf grofse Genauigkeit Anspruch machen, da sie sehr klein gezeichnet werden müssen, um diejenige Kurve, die die Dämmerungswerte der homogenen Lichter darstellt, nicht über alles zulässige Mafs zu vergröfsern; aus diesem Grunde hat auch die Rotkurve überhaupt nicht über den Punkt 13,5 hinaus fortgesetzt werden können. Doch ist das, worauf es ankommt, mit genügender Schärfe und anschaulich zu erkennen.

Mischungsanteile, auseinanderfallen, lehrt in der so entstandenen Figur 3 der Augenschein ebenso, wie die Zahlen der Tabelle.

In verschiedenen Richtungen wollen wir nun aber diese Verhältnisse noch des genaueren erläutern. Zunächst mag bemerkt werden, daſs man jene Differenzen noch stärker machen kann, wenn man ein Rot von noch gröſserer Wellenlänge, z. B. Lithiumrot, als langwelligen Mischungsbestandteil wählt. Wir haben uns, wie bei der Herstellung der Mischungsgleichungen, so auch für die Berechnung, auf ein Licht beschränkt, dessen Stäbchenvalenz noch mit leidlicher Genauigkeit festzustellen ist, während die des Lithiumrots bereits so gering ist, daſs ihre Bestimmung auf Schwierigkeiten stöſst. Wir können uns aber leicht eine Vorstellung davon bilden, wie sich die Dinge ändern würden, wenn wir als langwelligen Gemischanteil Lithiumrot statt des Lichtes 642 $\mu\mu$ wählten. In den Hellgleichungen wird ein Teil dieses letzteren Lichtes durch $\frac{79}{33}$ Teile Lithiumrot vertreten. Der Dämmerungswert des Lithiumrots ist aber wohl sicher kleiner als 0,2 von dem des Lichtes [2]. Ersetzten wir also in dem Gemische das Licht 642 durch Lithiumrot, so würde dadurch der Dämmerungswert des Rotanteils noch weiter, mindestens auf die Hälfte des jetzt in Rechnung gebrachten vermindert werden. Ähnlich wird die Differenz auch noch gröſser, wenn wir in den Hellgleichungen als Blaubestandteil statt des Lichtes 460,8 ein noch brechbareres (etwa ein Licht 435 $\mu\mu$) benutzten; denn der Blauwert dieses letzteren beträgt mehr als ein Drittel von jenem, der Dämmerungswert dagegen kaum ein Achtel. Verwendeten wir also in der Hellgleichung dieses letztere Licht, so würde der Dämmerungswert des Blauanteiles im Gemisch auf weniger als die Hälfte reduziert werden.[1]

Die Hauptthatsache, auf die wir Gewicht legen, ist die, daſs in den Hellgleichungen die beiden gleich erscheinenden

---

[1] Eine nicht uninteressante Kontrolle zu den eben erörterten Versuchen bilden übrigens ältere, die nach etwas abweichendem Verfahren ausgeführt wurden. Als Ausgang diente eine Hellgleichung zwischen homogenem Licht 492 $\mu\mu$ und einer Rot-Blaumischung (645 und 435 $\mu\mu$). Nach Einstellung einer solchen wurde durch Verkleinerung des Okularspaltes abgeschwächt, das Auge dunkeladaptiert, wobei nun das homogene Licht sehr stark überwog, und schlieſslich ermittelt, wie stark

Lichter auch nicht entfernt gleichen Dämmerungswert besitzen. Da bekanntlich von Hering noch unlängst der Versuch gemacht worden ist, alle Angaben dieser Art (wenigstens bezüglich des Trichromaten) auf Täuschungen zurückzuführen, die durch mangelnde Berücksichtigung der Maculapigmentierung herbeigeführt seien, so müssen wir zunächst darauf hinweisen, dafs gegenüber den obigen Gleichungen eine solche Einrede nicht möglich ist. Die Hellgleichungen sind auf kleinem Felde und mit möglichst direkter Fixierung hergestellt worden, die Dunkelgleichungen auf gröfserem Felde mit beliebig wanderndem Blick; ohne Zweifel also entsprechen die letzteren den, wie auch oben schon angeführt wurde, weniger stark pigmentierten Netzhautstellen. Ob nun beim Übergange von der stärker zu der schwächer pigmentierten Stelle das homogene Licht oder die Mischung mehr an Dämmerungswert gewinnt, ist leicht zu beurteilen. Da nämlich, wie aus den Untersuchungen von Sachs bekannt ist und sich auch leicht bestätigen läfst, die Absorption gegen das brechbare Ende des Spektrums immer stärker wird, so mufs der Blauanteil der Mischung bei Übergang auf den schwächer pigmentierten Teil mehr gewinnen, als das homogene Licht, während der Rotanteil unverändert bleibt. Daraus ist ersichtlich, dafs überall da, wo in der Mischung der Dämmerungswert überwiegend auf Rechnung des Blauanteils kommt, durch Übergang auf die schwächer pigmentierte Stelle die Mischung ins Übergewicht über das homogene Licht kommen könnte, ganz wie dies von Hering auch ausgeführt worden ist. Mindestens von dem Lichte [15] in unserer obigen Bezeichnung an (Wellenlänge $< 515\ \mu\mu$) ist nun dies sicher der Fall. Gleichwohl ist es das homogene Licht, welches beim Übergang auf den schwächer pigmentierten Teil an Helligkeit gewinnt, und zwar äufserst beträchtlich.

Bei den homogenen Lichtern von 550 $\mu\mu$ bis 530 $\mu\mu$ (etwa bei [11] bis [12]) könnte, rein qualitativ genommen, die Differenz

---

das homogene Licht reduziert werden mufste, damit wieder Gleichheit der Felder (also eine Dunkelgleichung) bestand. Es fand sich dazu erforderlich eine Abschwächung auf 0,14, 0,095, 0,13, 0,16, 0,14, 0,115, 0,12 — im Mittel 0,13 seines ursprünglichen Wertes. Hieraus ergiebt sich die Dämmerungsvalenz des homogenen Lichtes 7,7 fach gröfser als die des helläquivalenten Gemisches. Nach den Zahlen obiger Tabelle wäre der 6,8 fache Wert zu erwarten.

in dem Sinne der Heringschen Erklärung aufgefaſst werden. Obwohl man dabei freilich der Pigmentabsorption Werte zuschreiben müſste, die sie sicher nicht besitzt, wollen wir diese Zahlen hier unerörtert lassen. Wenden wir uns dagegen noch einen Augenblick den Lichtern des weniger brechbaren Spektralteiles zu. Schon von der Wellenlänge 550 $\mu\mu$ an ist der Blauanteil merklich = Null. Für helladaptiertes Auge und kleines Feld läſst sich also eine völlig zutreffende Gleichung z. B. zwischen Licht 550 $\mu\mu$ und solchem von 645 oder auch 670 $\mu\mu$ herstellen. Nun betrachte man die Dämmerungswerte dieser gleich erscheinenden Lichter; man findet dann, daſs diejenige des Lichtes 550 etwa 100fach gröſser als die des hellāquivalenten Quantums eines Lichtes von 642 $\mu\mu$ ist. Hier nun ist zwar zuzugeben, daſs die Beseitigung der Maculaabsorption dem Lichte 550 $\mu\mu$ zu gute kommen könnte; denn diese fängt nach Hering ja in der That im Grüngelb bereits an merklich zu werden. Allein die Annahme so kolossaler Absorptionen bei jener Wellenlänge wird kaum noch einen Vertreter finden; zu welchen Vorstellungen würden wir auch über die Absorption des Blaus geführt werden, wenn man die, qualitativ doch festgestellte Natur der Pigmentierung berücksichtigen und für das grünliche Gelb solche Absorptionen annehmen wollte.

Instruktiv ist es ferner, die Lage der Maxima einerseits in der Kurve der Stäbchenvalenzen, andererseits in der der Rotwerte zu betrachten. Es ist kein Zweifel, daſs dieselben deutlich auseinanderfallen; das eine Maximum finden wir etwa bei [5] oder 603 $\mu\mu$, das andere bei [10] bis [12] oder 552 bis 536 $\mu\mu$. Wenn nun die Stäbchenvalenz ihren höchsten Wert an dieser letzteren Stelle hat, wie sollen wir uns (unter Herings Annahme) erklären, daſs in den Hellgleichungen das Maximum bei ca. 600 gefunden wird? Ohne Spur einer Sättigungsdifferenz stellt der Grünblinde die Hellgleichungen zwischen den Lichtern 600 bis 580 $\mu\mu$ her; dabei zeigt sich aufs deutlichste, daſs die Helligkeit schon von 603 $\mu\mu$ an nicht mehr zunimmt und bei 590 $\mu\mu$ sogar schon wieder deutlich vermindert, der Gipfel der Kurve überschritten ist. Wie soll man dies aus Absorptionsverhältnissen erklären, da doch diese zum mindesten bis zum reinen Gelb sicher keine Rolle spielen? Selbst wenn man also von allen erhaltenen Zahlenwerten überhaupt absehen wollte, so würde hier doch schon die unbezweifelbare Differenz in dem all-

gemeinen Gange der einen und der anderen Kurve uns lehren, daſs die Dämmerungsäquivalenz der Lichter unter anderen Bedingungen steht, als die Helläquivalenz. Und das gleiche gilt auch für die brechbarere Spektralhälfte; denn hier sehen wir von 510 $\mu\mu$ ab (wo die Dämmerungswerte des Rotanteils schon gar nicht mehr in Betracht kommen) die in den Hellgleichungen figurierenden Blauwerte noch ständig (bis [23]) zunehmen, während die Kurve der Dämmerungswerte hier stark absinkt.

Wir können hiernach nur zu dem Ergebnis gelangen, daſs die Ungleichheit der Dämmerungswerte in den Hellgleichungen der Grünblinden eine unbezweifelbare Thatsache ist, eine Thatsache, die so gut konstatiert ist, wie nur irgend eine auf diesem Gebiete der physiologischen Optik. Auch werden die obigen Beobachtungen genügen, um dieses Verhalten zu illustrieren und von seinem Betrage eine wenigstens angenäherte quantitative Vorstellung zu geben. Es wird angemessen sein, an dieser Stelle darauf hinzuweisen, wie sich dies Ergebnis zu den Beobachtungen anderer Autoren stellt.[1] In dieser Hinsicht sei zunächst bemerkt, daſs unser Befund denjenigen Königs vollkommen bestätigt. In der That ist der Satz, den wir aufstellen, ja auch von König aus seinen Beobachtungen abgeleitet und nur in einer abweichenden Weise, im Hinblick auf theoretische Vorstellungen, formuliert worden. Die Thatsachen aber, auf die wir uns stützen, sind genau die nämlichen, die auch von König beobachtet sind. Es wurde ja auch schon oben erwähnt, daſs sowohl die Hell- als die Dunkelgleichungen unserer Beobachtungen sehr nahe mit den seinigen übereinstimmen. Unterwirft man diese letzteren der gleichen Berechnung von den unsrigen, so ist das Resultat natürlich auch das gleiche.

Was Hering anlangt, so wird man es vielleicht auffallend finden, daſs der Gegensatz der Hell- und Dunkelgleichungen von ihm nicht bemerkt worden ist, da er doch die letzteren zuerst einigermaſsen systematisch untersucht hat. Soweit ich

[1] Es mag an dieser Stelle auch angeführt werden, daſs systematische Beobachtungen ganz der gleichen Art, die seither von einem anderen Grünblinden, Dr. Stark, ausgeführt wurden, sowohl in Bezug auf die Hell- als die Dunkelgleichungen, als auf die Beziehungen dieser beiden untereinander mit den hier mitgeteilten aufs beste übereinstimmen.

sehe, dürfte das nur daran liegen, daſs HERING die Hellgleichungen der Dichromaten niemals direkt auf ihre „Weiſswerte" geprüft, auch niemals systematisch in einer Weise dargestellt hat, welche etwa die rechnerische Ermittelung ihrer Weiſswerte gestattet hätte. Wie aber dem auch sein mag, jedenfalls finden sich in HERINGS Publikationen keine den unsrigen entgegenstehende Hellgleichungen; sind wir also auch nicht in der Lage, uns auf übereinstimmende Beobachtungen zu stützen, so haben wir doch auch nicht etwa nötig, uns mit entgegenstehenden auseinanderzusetzen. Wir legen Wert darauf, dies zu konstatieren; denn die betreffenden Thatsachen sind, das wünschen wir zu betonen, keineswegs sozusagen Finessen einer delikatesten Beobachtung, sondern sie gehören zum Palpabelsten, was es im Gebiete der Gesichtsempfindungen geben kann. Sie lassen sich daher auch mit den farbigen Scheiben des ROTHEschen Kreisels, wenn auch nicht so vollkommen wie am Spektralapparat, doch sehr deutlich demonstrieren. Man lasse von einem Grünblinden eine Hellgleichung zwischem einem passend mit Schwarz abgeschwächten Bläulichgrün und einer Mischung von Rot und Blau herstellen und betrachte diese bei stark herabgesetzter Beleuchtung und dunkeladaptiertem Auge — man wird den beträchtlichen Unterschied der Dämmerungswerte leicht konstatieren, um so besser, je reiner das angewandte Rot und Blau ist.[1]

IV.

Die theoretische Erwägung wird gegenüber der Thatsache, daſs die Dämmerungswerte der helläquivalenten Lichter sehr ungleich sein können, zwischen zwei Deutungen die Wahl haben. Die erste ist die von KÖNIG zuerst angenommene, daſs die Erregbarkeitskurven von der Intensität des einwirkenden Lichtes und (wie hinzuzufügen wäre) dem Adaptationszustande des Auges abhängen; die zweite ist die von uns bevorzugte, daſs es sich um das wechselnde Hervortreten zweier verschiedener Apparate handelt, und daſs die Reizwerte zweier Lichter für den einen gleich, dabei aber für den anderen un-

[1] Bei Benutzung der neuerdings gelieferten ROTHEschen Scheiben ist eine solche Gleichung z. B. 290° Rot (1) + 70° Blau (8) = 143° Blaugrün (6) + 217° Tuchschwarz. Die Scheiben sind hier nach den Nummern der in der ROTHEschen Preisliste von 1893 enthaltenen Muster bezeichnet.

gleich sein können. Es scheint uns nicht erforderlich, die Gründe, welche zu Gunsten der letzteren Auffassung sprechen, hier wiederum vollständig aufzuführen, um so weniger, da die Betrachtung der Foveafunktionen die Frage unseres Erachtens mit Sicherheit entscheidet. Schon in einer früheren Abhandlung[1] wurde mitgeteilt, dafs auf kleinen, direkt fixierten Bezirken die Hellgleichungen auch bei starker Abschwächung aller Lichter und bei Dunkeladaptation des Auges gültig bleiben.

Weitere Untersuchungen, von denen sogleich noch zu reden sein wird, haben dies für den einen von uns, sowie für einen anderen Grünblinden bestätigt. Keineswegs aber erwies sich die Fovea als monochromatisch (total farbenblind). Überhaupt bestand zwischen Fovea und Nachbarteilen für die Hellgleichungen nur ein geringfügiger Unterschied. Erscheint es hiernach gesichert, dafs die Bestandteile des dichromatischen Apparates der Fovea wie deren Nachbarschaft zukommen, so wird man um so weniger geneigt sein, die abweichenden Verhältnisse des Dämmerungssehens, welche der Fovea abgehen, auf Besonderheiten dieser Apparate zurückzuführen, sondern man wird, wie uns scheint, ganz naturgemäfs, lediglich durch die Betrachtung der physiologischen Funktion dazu geführt, diese besondere, zentral fehlende Funktionsweise dem zentral fehlenden Apparate zuzuschreiben.

Erwünscht war bei dieser Sachlage die Möglichkeit, die Gröfse des zentralen Feldes, für welches die Hellgleichungen auch bei Abschwächung und Dunkeladaptation gültig bleiben, messend zu bestimmen. Der eine von uns, sowie ein anderer Grünblinder, Dr. Stark, haben die nicht ganz leichten Versuche hierüber ausgeführt. Es wurde zu diesem Zwecke vor den Okularspalt des Farbenmischapparates ein Deckgläschen aufgekittet, welches das Spiegelbild eines äufserst kleinen Lichtpünktchens in die Mitte des kreisförmigen Feldes entwarf. Eine passend abgeschwächte Hellgleichung wurde dann nach längerer Dunkeladaptation beobachtet und die Feldgröfse mit Hülfe der Irisblende variiert. Bei geringer Feldgröfse verschwand die bei abgewichenem Blick sehr deutliche Differenz der Hälften in dem Augenblick, wo der Blick auf die Fixiermarke gerichtet wurde, bei gröfserer Ausdehnung blieb der

[1] *Zeitschr. f. Psychol.* IX. S. 97.

Unterschied am Rande sichtbar. Es wurde diejenige Gröſse gesucht, bei welcher die Felder, zentral fixiert, noch in ihrer ganzen Ausdehnung gleich wurden. Verglichen wurde ein homogenes Licht 510 $\mu\mu$ (in einigen Fällen 495 oder 500 $\mu\mu$) mit einer Mischung aus 645 und 435 $\mu\mu$. Der Unterschied ist in diesem Falle auf peripheren Teilen sehr beträchtlich; da überdies das homogene Licht heller und blasser, das Gemisch dunkler und gelber wird, so ist der Unterschied (was wichtig ist) entgegengesetzt demjenigen, der etwa durch die periphere Abnahme der Maculapigmentierung bewirkt sein könnte. Da im HELMHOLTZschen Apparate die Trennungslinie der Felder vertikal liegt, so kann auf diese Weise der Vertikaldurchmesser des ex hypothesi als stäbchenfrei zu betrachtenden Bezirks bestimmt werden. Die hier gemachten Einstellungen waren die folgenden, wobei wir die Zahlen so umgerechnet geben, wie die betreffenden Werte auf eine Entfernung von 1 m projiziert erscheinen würden. Dr. NAGEL stellte ein (in einer ersten Versuchsreihe)[1] 31,8*; 31,3*; 35,0*; 36,7*; 29,2†; 27,4†; 29,8†; 32,1†; 34,0*; 29,8; 28,7; 31,3; im Mittel **31,4 mm**; an einem späteren Tage 41,4; 42,0; 38,0; 36,7; 38,0; 36,6; im Mittel **38,8 mm.**

Herr Dr. STARK stellte ein an einem ersten Tage 38,0; 51,9; 40,7; 39,3; 43,4; im Mittel **42,6 mm**; an einem folgenden Tage 52,1; 35,4; 35,9; 37,0; 22,0; 27,4; 27,1; 307,; 32,3; 38,0; im Mittel **33,8 mm.**

Wer die Schwierigkeit einer derartigen Beobachtung richtig würdigt, wird die Schwankungen, die dabei vorkommen, nicht überraschend finden. Vielleicht wird es gelingen, durch Abänderungen des Verfahrens zu schärferen Ergebnissen zu gelangen. Bei dem hohen Interesse des Gegenstandes schien es uns aber geboten, auch diese Resultate mitzuteilen. Denn man wird aus ihnen jedenfalls das mit Sicherheit entnehmen, daſs die Dämmerungswerte der verschiedenen Lichter in einem kleinen zentralen Bezirke nicht zur Geltung kommen, und man wird auch die Gröſse dieses Bezirkes im vertikalen Durchmesser so veranschlagen können, daſs sie auf Entfernung von 1 m projiziert etwa 30 bis 40 mm ausmacht.

---

[1] Bei den mit einem * bezeichneten Beobachtungen war das homogene Licht 495, bei den mit einem † bezeichneten 500 $\mu\mu$, bei den übrigen 510 $\mu\mu$ benutzt.

Nach den neuesten Messungen von Koster[1] wäre anzunehmen, dafs der horizontale und vertikale Durchmesser des ganz stäbchenfreien Bezirkes auf 1 m projiziert etwa 33 mm beträgt, während erst aufserhalb eines gröfseren, etwa 53 mm messenden, die Zahl der Stäbchen erheblich ist. Man kann hiernach im Augenblick wohl nur sagen, dafs die Übereinstimmung der anatomischen und der physiologischen Messung eine zufriedenstellende ist. Man könnte vielleicht sogar geneigt sein, eine eklatante Bestätigung der Theorie hierin zu finden; doch wäre dies wohl insofern verfrüht, als doch die Ergebnisse beider Messungen noch etwas unsicher und schwankend sind. Es ist wohl nicht unmöglich, dafs in fortgesetzten Untersuchungen sich beide noch etwas modifizieren. Immerhin wird man die wenigstens ungefähre Übereinstimmung zur Zeit als beachtenswert konstatieren dürfen.[2]

Wie in einer früheren Abhandlung angedeutet wurde, ist es zunächst zweifelhaft, ob die Empfindung, welche durch eine Erregung der Stäbchen hervorgerufen wird, genau mit derjenigen übereinstimmt, welche das gemischte weifse Tageslicht, auf den trichromatischen Apparat wirkend, hervorruft. Nannten wir sie gleichwohl schlechtweg eine farblose, so war dabei im Auge zu behalten, dafs auch der Begriff des Farblosen kein absolut feststehender ist. Es war ferner gezeigt worden, dafs, wenn man eine Hellgleichung, z. B. zwischen einem homogenen Licht und einer Blau-Rot-Mischung, abschwächt und diese wegen der überwiegenden Stäbchenvalenz des homogenen Lichtes unrichtig wird, im allgemeinen dann zur Aufrechterhaltung der Gleichheit nicht blofs eine stärkere Verminderung, sondern auch eine qualitative Änderung des homogenen Lichtes erforderlich ist, eben weil die Stäbchenerregung eine von dem betreffenden Empfindungseffekt abweichende Empfindung liefert, ihre Zumischung also in dem Sinne wie eine qualitative Änderung des Lichtes wirkt. Es ergab sich daraus die Möglichkeit, dasjenige Licht aufzusuchen, für welches bei einem derartigen Versuch nur eine quantitative, nicht aber eine qualitative Veränderung

---

[1] *Arch. f. Ophthalm.* XLI. 4. S. 10.

[2] Vergl. die über die Gröfse des stäbchenfreien Bezirks gemachten Auseinandersetzungen in der gleichzeitig im *Arch. f. Ophthalm.* XLII 3. erscheinenden Arbeit v. Kries, Über die funktionellen Differenzen des Netzhautzentrums und der Nachbarteile.

erforderlich ist; von diesem würde sich sagen lassen, dafs es, auf den dichromatischen Apparat wirkend, die gleiche Empfindung auslöst, wie sie durch eine beliebige Erregung der Stäbchen erzielt wird.

Wir wollen ein solches homogenes Licht wegen seiner eben berührten Eigenschaft ein invariables, den betreffenden Punkt im Spektrum den invariablen Punkt nennen. Es war zu ermitteln, ob dieser mit dem neutralen Punkt im gewöhnlichen Sinne zusammenfällt.

Als Ausgangspunkt für die Versuche diente dasjenige homogene Licht, welches dem diffusen Tageslicht (dem gespiegelten Lichte eines dicht und gleichmäfsig bewölkten Himmels) unter den für die Hellgleichungen aufgestellten Bedingungen gleich erschien. Dies fand sich für zentrale Beobachtung bei 497, für etwas exzentrische Beobachtung bei 495 $\mu\mu$ ein Unterschied, der den deutlichen, aber nicht sehr erheblichen Einflufs der Macula-absorption zum Ausdruck bringt. Nur wenig verschieden hiervon war das homogene Licht, welches, ohne Vergleichslicht, für sich allein als farblos eingestellt wurde.

Diese Ergebnisse stimmen, wie man sieht, mit den sonst über die Lage des neutralen Punktes im Spektrum gemachten Angaben gut überein. Mit grofser Deutlichkeit zeigt sich nun, dafs ein homogenes Licht 495 $\mu\mu$ und ein ihm bei hoher Intensität gleich erscheinendes Blau-Rot-Gemisch bei proportionaler Abschwächung noch qualitativ ungleich werden; das homogene Licht wird (nicht nur zu hell, sondern auch) zu blau, oder mit anderen Worten: die Stäbchenempfindung (venia verbo) ist im Vergleich zu der hier zum Ausgangspunkt genommenen, durch Licht 495 $\mu\mu$ hervorgerufenen, noch merklich bläulich. Dieses Verhältnis liefs sich sogar noch über die Wellenlänge 490 hinaus, bis nahezu 485 $\mu\mu$ beobachten. Dagegen konnte die Lage des invariablen Punktes nach der anderen Seite nicht mit gleicher Sicherheit begrenzt werden. Das hat seinen einfachen Grund. Das ganze Verfahren beruht ja auf dem beträchtlichen Unterschiede der Stäbchenvalenz, welchen das homogene Licht einer- und das Blau-Rot-Gemisch andererseits besitzt. Dieser Unterschied wird nun aber, je kurzwelliger wir das homogene Licht nehmen, immer geringer. So fand sich denn die zu erwartende entgegengesetzte Abweichung, nämlich ein Zublau-werden des Gemisches, bei Anwendung von einem

Blau 460 $\mu\mu$ überhaupt nur schwer zu konstatieren. Wurde statt dessen ein Blau von 435 $\mu\mu$ gewählt, so trat die Änderung in diesem Sinne etwa von 480 $\mu\mu$ ab deutlich hervor. Wir können danach etwa sagen, daſs der invariable Punkt des Spektrums sich zwischen die Grenzen 485 und 480 $\mu\mu$ einschlieſsen läſst; aber es würde mit Rücksicht auf die erwähnten Umstände falsch sein, ihn etwa in der Mitte dieses Spatiums zu suchen; vielmehr läſst sich sagen, daſs er vermutlich der oberen Grenze, 485 $\mu\mu$, ziemlich nahe liegt. Jedenfalls aber — und das ist vielleicht hauptsächlich von Interesse — liegt der betreffende Punkt deutlich blauwärts von derjenigen Stelle des Spektrums, welche dem gemischten Tageslichte, sei es dem unveränderten, sei es dem durch die Maculaabsorption veränderten, gleich erscheint, und ebenso auch merklich blauwärts von demjenigen, der in rein subjektiver Weise als farblos ermittelt wird.

Damit hängt es denn wohl auch zusammen, daſs die durch schwache Lichter hervorgerufene Empfindung von manchen Personen direkt als leicht bläulich bezeichnet wird.

VI. Anhang.

Der in den obigen Untersuchungen benutzte Apparat war ein Helmholtzscher Farbenmischapparat neuerer Konstruktion; seine Einrichtung stimmte in der Hauptsache mit derjenigen überein, welche von König und Dieterici,[1] dann von Tonn[2] beschrieben ist; mancherlei Abweichungen waren auf Veranlassung von Herrn Prof. A. König angebracht worden, der sich der Herstellung des Apparates bei der Firma Schmidt & Hänsch mit groſser Liebenswürdigkeit angenommen hat, wofür auch an dieser Stelle herzlichst gedankt sei.[3]

Wiewohl die Einrichtung des Apparates in der Hauptsache als bekannt gelten darf, wird doch die Erwähnung einiger Punkte unerläſslich sein. Er ist, soweit wir urteilen

---

[1] *Zeitschr. f. Psychol.* IV. S. 243.

[2] *Zeitschr. f. Psychol.* VII. S. 280.

[3] Der Apparat ist eine durch Fortlassung einzelner Teile entstandene Vereinfachung desjenigen, den der Verein deutscher Mechaniker und Optiker nach Angabe des Herrn König bei Schmidt und Hänsch bauen lieſs und Helmholtz zu seinem 70. Geburtstage schenkte. (Beschrieben in *Zeitschr. f. Instrumentenkde.* XIII. S. 200.)

können, in der That der beste, der bis jetzt für derartige Untersuchungen konstruiert worden ist. Abgesehen von der grofsen Mannigfaltigkeit der Lichtmischungen und Abstufungen, die er gestattet, ist besonders die grofse Leichtigkeit der Handhabung hervorzuheben, welche die Herstellung von Gleichungen (auf die es ja fast immer ankommt) auch den weniger Geübten ermöglicht. Wenn wir im Folgenden einige dem Apparate anhaftende Übelstände anführen, so geschieht dies nicht, um blofs zu tadeln, auch nicht eigentlich, um Fingerzeige für Verbesserungen zu geben, sondern vor allem, um die besondere Art unseres Vorgehens zu motivieren. Da sowohl bei den Hell- wie bei den Dunkelgleichungen immer das eine Feld mit einem homogenen Lichte zu erleuchten war, so konnte aus dem einen Kollimator der nur für die Mischungen zu verwendende Doppelspat entfernt werden. Die Aufsuchung der gewünschten Wellenlängen bot dann keine weitere Schwierigkeit, nachdem die Lage der *Li*-, *Na*-, *Tl*-, *Sr*- und *K*-Linie einmal bestimmt war, und daraus nach dem Vorgange von König und Dieterici eine Tabelle für die den Teilstrichen der Kollimatorskala entsprechenden Wellenlängen ausgerechnet war. Zu beachten war nur, dafs, wie wiederholte Kontrollversuche ergeben, auch bei der neuerlich dem Apparat gegebenen Einrichtung, bei welcher die Stellung des Kollimators direkt an einer am Apparat festen, sehr grofsen Skala abgelesen wird, kleine Änderungen in der Lage der Linien vorkommen, so zwar, dafs durchgängig für eine bestimmte Wellenlänge heute eine um ein oder zwei Zehntel-Teilstriche andere Kollimatoreinstellung erforderlich sein kann, als vor vierzehn Tagen. Wir haben daher vor jeder Versuchsreihe an beiden Kollimatoren Kontrollbestimmungen der Natrium- oder Lithiumlinie gemacht. Übrigens haben wir es richtig gefunden, da doch alle Beobachtungen sich zunächst auf das Dispersionsspektrum beziehen, zur Bezeichnung der Lichter, auch in den obigen tabellarischen und graphischen Darstellungen, die Angabe der spektralen Orte, in Teilstrichen der Kollimatorskala, zu bemerken.

Wie schon oben erwähnt, war das untersuchte Spektrum in allen Fällen dasjenige des Kollimators II; für dieses ist nachstehend die den verschiedenen spektralen Orten entsprechende Wellenlänge zusammengestellt.

0	670,8	12	536
1	656	13,5	525
2	642	15	515
3	628	16,5	505
4	615	18	496
5	603	19,5	488
6	591	21	480
7	581	23	469
8	571	24,7	460,8
9	561	28	448
10	552	31	436
11	544		

Das zweite Feld war bei den Hellgleichungen mit einer Mischung zweier Lichter zu erleuchten. Es wäre in mancher Hinsicht erwünscht gewesen, als roten und blauen Bestandteil der Mischung ein möglichst lang- und möglichst kurzwelliges Licht zu wählen, etwa 670,8 (*Li*) und 436 $\mu\mu$. Wir wählten jedoch als langwelligen Bestandteil 645 $\mu\mu$, weil, wie oben schon erwähnt, der Dämmerungswert dieses Lichtes noch ziemlich sicher bestimmt werden kann, was bei 670 kaum mehr möglich ist; im übrigen ist die Wahl des einen oder anderen von geringem Belang, da die beiden Lichter in einem bestimmten und leicht zu ermittelnden Verhältnis helläquivalent sind, somit die für das eine geltenden Hellgleichungen aus dem für das andere ermittelten ohne weiteres, lediglich durch Multiplikation mit einem Faktor, berechnet werden können. — Als kurzwelliges Licht 436 zu wählen, ging nicht an, weil dasselbe im Dispersionspektrum des Gaslichtes bereits zu lichtschwach ist. Wir beschränkten uns daher auf Licht von der Wellenlänge des *Sr*-Lichtes (460,8 $\mu\mu$). Mit Benutzung dieses Blaus kann nun die Untersuchung der homogenen Lichter auch nur bis 460,8 geführt werden, da ein kürzerwelliges, etwa 450 oder 435, gesättigter blau erscheint, es also unmöglich ist, zwischen 435 und 460, noch mehr natürlich zwischen 435 und einer Mischung von 460 mit Rot eine Gleichung zu erhalten. Um also die homogenen Lichter bis 436 zu untersuchen, war es erforderlich, auch mit dem Blaubestandteile der Mischung bis 436 hinauszurücken. Dies haben wir, da diese Ausdehnung der Untersuchung aus manchen Gründen wünschbar war, auch gethan und für die Endstrecke den Doppelspat so weit verschoben,

daſs der Blauanteil der Mischung die Wellenlänge 435 $\mu\mu$ hatte. In dieser Weise wurde dann das Licht [24,7], [28] und [31] bestimmt. Da das Licht 460,8 solchergestalt doppelt bestimmt wurde, nämlich einmal gegen einen Blaubestandteil von ebenderselben Wellenlänge, sodann gegen einen solchen von 435, so war dadurch die Möglichkeit gegeben, auch die Blauwerte der homogenen Lichter in derselben Einheit durch das ganze Spektrum anzugeben. Berücksichtigt man, daſs 100 Teile 460,8, etwa 216 Teilen 436 + einer sehr kleinen Quantität Rot helläquivalent waren, so wäre, streng genommen, die Umrechnung auf dieses kurzwellige Blau so vorzunehmen gewesen, daſs die mit 460,8 ermittelten Blauwerte mit 2,16 multipliziert und den Rotwerten ein gewisser kleiner Betrag hinzugefügt würde. Die letztere Korrektion haben wir aber unterlassen, da sie viel kleiner ausfiel, als alles, was an den Rotwerten sich noch mit Sicherheit bestimmen läſst (es wird auf die Gründe hierfür gleich noch zurückzukommen sein) und uns entsprechend darauf beschränkt, die Rotwerte von [24,7] ab nur mit der Bezeichnung *Sp* (Spur) einzutragen, da sie sich eben nicht mehr sicher bestimmen lassen.

In Bezug auf die Mischungen wäre sodann noch zu erwähnen, daſs, wie es König und Dieterici angeben, so auch bei unserem Apparat die bei Benutzung des Doppelspats entstehenden zwei Spektren nicht genau in derselben Ebene liegen. Die Einstellung konnte daher nur für den Rotanteil genau gemacht werden; das den Blauanteil liefernde Spektrum lag dagegen nicht genau in der Ebene des Okularspaltes; daher ist die Bestimmung dieses Blauanteils hinsichtlich seiner Wellenlänge etwas unscharf. Praktisch ist dies indessen um so weniger von Bedeutung, als es überhaupt nicht von groſsem Belang ist, ob wir den Blaubestandteil etwas länger- oder kürzerwellig nehmen; die Blauwerte der homogenen Lichter würden dadurch alle nur mit einem konstanten Faktor multipliziert erscheinen.

Etwas genauer muſs auf die Quantitätsbestimmung der Lichter eingegangen werden. Dieselbe beruht bei unserem Apparat, wie bekannt, auf zwei Prinzipien; sie wird nämlich einmal durch Variierung der Spaltweite, sodann durch die Drehung des Nicolschen Prismas bei Anwendung zweier senkrecht zu einander polarisierten Spektren bewirkt. Bei den

Hellgleichungen kann man nicht wohl vermeiden, beide Hülfsmittel zu benutzen, und es ist wohl auch hinlänglich bekannt, wie hierbei zu verfahren ist. Wenn der Kollimator II das homogene Licht von der Wellenlänge λ liefert, der Kollimator I die Mischung, und wir eine Gleichung erhalten, indem der Kollimator II die Spaltweite S_2, der Kollimator I die Spaltweit S_1 hat und das NICOLsche Prisma auf α^0 steht, so wäre die Quantität des Lichtes λ proportional S_2, die des Rotanteils $= S_1 \sin^2\alpha$, die des Blauanteils $= S_1 \cos^2\alpha$, und wir erhielten für den Rot- und Blauwert des Lichtes λ die Werte $\frac{S_1}{S_2} \sin^2\alpha$ und $\frac{S_1}{S_2} \cos^2\alpha$. Die obigen Tabellen enthalten direkt diese Werte (mit 100 multipliziert).

Immerhin sind aber bei derartigen Berechnungen gewisse Voraussetzungen gemacht, die nicht ganz genau zutreffen. Zunächst ist es bekannt, dafs die Variierung der Spaltweite kein ideales Verfahren ist, weil man zugleich stets die Reinheit der Spektren verändert. Um diesen Fehler wenigstens in bestimmter Weise übersehbar zu machen, haben wir auf eine Variierung des Okularspaltes bei den Hellgleichungen ganz verzichtet und für die Untersuchungen ganz bestimmte Werte für den einen Spalt, teils für den das homogene Licht liefernden Spalte II, teils für den das Vergleichslicht resp. die Mischung liefernden Spalte I, festgesetzt. Die betreffenden fixierten Werte sind in der letzten Rubrik der die Hellgleichungen aufführenden Tabelle angegeben. Wer sich dafür interessiert, kann daraus, nach Mafsgabe der obigen Gleichung, auch die anderen Spaltweiten berechnen. Um die Beschaffenheit jedes der benutzten Lichter wirklich genau zu kennen, ist alsdann noch erforderlich, zu wissen, 1. eine wie grofse Verschiebung des Kollimators erforderlich ist, um bei 100 Teilstrichen Spaltweite ein Licht bestimmter Wellenlänge einmal von dem einen und dann von dem anderen Spaltrande auf die nämliche Stelle des Okulars zu erhalten. Die Bestimmung ergab, dafs der Spaltwert 100 einer Kollimatorverschiebung von zwei Teilstrichen entsprach. 2. ist zu fragen, eine wie grofse Verschiebung des Kollimators erforderlich ist, um ein und dasselbe Licht von dem linken bis zum rechten Rande des Okularspaltes zu verschieben. Diese Verschiebung fand sich = 0,8

Teilstrichen. Die Beschaffenheit der benutzten Lichter ist hiernach genau angebbar, was vielleicht für spätere Vergleichungen angenehm sein kann Streng genommen würde man sogar durch eine Reihe von Approximationsberechnungen dahin gelangen können, die Ordinaten für wirklich reine Lichter auszurechnen; doch dürfte vorderhand die Genauigkeit der Beobachtungen kaum grofs genug sein, um die umständlichen Rechnungen zu indizieren.

Abgesehen hiervon, ist zu bemerken, dafs der Benutzung sehr kleiner Spaltweiten für Quantitätsvergleichungen schon deswegen zu widerraten ist, weil da die Unsicherheit der Nullpunktsbestimmung und der tote Gang der Schraubenverschiebung bereits als merkliche Fehler in Betracht kommen. Beide Momente sind trotz der vorzüglichen Arbeit der Kollimatorspalten und ihrer bilateral-symmetrischen Bewegung nicht ganz aufser acht zu lassen und involvieren selbst bei sorgfältigster Bestimmung und häufiger Kontrolle des Nullpunktes eine Unsicherheit von 1—2 Teilstrichen, welche also bei Spaltweiten von mehr als 50 wohl aufser Betracht bleiben können, bei Werten bis gegen 20 herunter auch noch erträglich sind, die Benutzung von Spaltweiten unter 10 aber doch unthunlich, wenigstens nicht mehr quantitativ verwertbar macht.

Die Abstufung der Lichter mittelst polarisatorischer Vorrichtungen gilt für einwurfsfrei und ist es ohne Zweifel im allgemeinen auch. Ihre Verwendung bei den Hellgleichungen bedarf auch keiner weiteren Bemerkung. Es lag aber nahe, sie auch zu der umfangreicheren Variierung eines Lichtes zu verwenden, wie sie die Dunkelgleichungen erfordern. Dies gelingt ganz gut, wenn man bei der sonst für die Mischungen benutzten Einrichtung so verfährt, dafs der eine Mischungsbestandteil in Fortfall kommt. Dies Verfahren ist bei der oben mitgeteilten Bestimmung der Dämmerungswerte z. B. so verwendet worden, dafs das zu untersuchende Licht durch einen sehr engen Kollimatorspalt kam, der nicht variiert werden durfte. Als Vergleichslicht diente ein Licht 490, welches durch Nicoldrehung abgestuft werden konnte; es war nämlich zu diesem Zwecke Kollimator und Doppelspat so gestellt, dafs jenes Licht den langwelligen Bestandteil einer Mischung darstellte, der kurzwellige aber bereits ins Ultraviolett fiel und also ganz unsichtbar, jedenfalls von zu vernachlässigender Stärke war. Das Ver-

fahren, innerhalb gewisser Grenzen sehr gut und unbedingt zuverlässig, hat indessen doch auch eine gewisse Grenze der Anwendung; die Auslöschung ist nämlich da, wo sie theoretisch vollständig sein sollte, doch nie eine ganz absolute, schon wegen der Zerstreuung einer gewissen Menge von Licht an den Grenzflächen; bei weiteren Kollimatorspalten wird also auch bei vollständiger Kreuzung der Polarisationsebenen das Feld nicht absolut dunkel. Aus diesem Grunde fällt bei NICOL-stellungen, die sich der vollen Auslöschung zu sehr annähern, mehr Licht durch, als der Rechnung entspricht, man wird die betreffenden Helligkeiten zu niedrig bestimmen. Hieraus ergab sich für die Dunkelgleichungen folgendes Verfahren als bestes. Das Licht des zu bestimmenden Spektrums (Koll. II) wurde mit einer sehr geringen und während des ganzen Versuches nicht zu verändernden Spaltweite angewandt. Das Vergleichslicht des Kollimators I (von konstanter Wellenlänge) wurde für die höheren Werte der Dämmerungsvalenzen mit einer Spaltweite 100 benutzt und in der oben erwähnten Weise mittelst NICOLdrehung abgeschwächt. Dies Verfahren wurde eingehalten, bis diese Abschwächung sehr bedeutend wurde, d. h. etwa, bis der Winkel der beiden Polarisationsebenen auf 83° stieg; an dieser Stelle wurde dann der Spalt des Vergleichslichtes auf 20° verringert und mit diesem kleineren Werte die geringen Valenzen von 615 $\mu\mu$ auf- und von 469 $\mu\mu$ abwärts bestimmt.

Der unglatte Verlauf der Kurve 2 bei [5] verrät übrigens, dafs auch der Punkt [5] wohl schon etwas zu niedrig bestimmt ist, während der für [4] mit Spaltweite 20 und geringerer Abschwächung durch Polarisation wieder richtig ist.

Die der Kurve 2 hinzugefügten Kontrollpunkte beziehen sich auf ältere Versuche des gleichen Beobachters (NAGEL), bei welchen die Quantitätsbestimmungen ausschliefslich durch Variierung der Spaltweiten erfolgten; sie sind das Mittelergebnis einer gröfseren Zahl von Bestimmungen. Die Übereinstimmung ist, wie man sieht, in der weniger brechbaren Spektralhälfte recht gut; nur bei [4] liegen die durch Polarisation bestimmten Werte etwas zu tief, was auf den oben beregten Umstand zurückzuführen ist. In der brechbareren Spektralhälfte liegen die älteren Werte durchweg etwas höher, auch das Maximum ist etwas weiter rechts. Der Grund hierfür dürfte aber, da die Erscheinung sich in der linken Spektralhälfte nicht in gleicher Weise zeigt,

wohl kaum in einer konstanten Differenz zwischen Varriierung durch Polarisation einer- und durch Spaltweiten andererseits zu suchen sein. Wir möchten ihn eher darin vermuten, dafs die älteren Beobachtungen sich auf das Spektrum des Kollimators I, die neueren auf Kollimator II bezogen, und thatsächlich wohl die Helligkeitsverteilung in beiden etwas verschieden sein kann. Natürlich ist für die graphische Darstellung hier die Länge jenes Spektrums auf die des anderen reduziert; sie sind übrigens so nahe übereinstimmend, dafs eine Differenz in der Dispersion sicher nicht in Betracht kommen kann. Übrigens können wir die Möglichkeit nicht in Abrede stellen, dafs jene älteren Versuche durch kleine Fehler in der Bestimmung der Wellenlänge beeinflufst sind, da wir damals noch nicht eine j e d e s m a l i g e Kontrolle der *Na*- oder *Li*-Linie eingeführt hatten. Ist also diesen Versuchsergebnissen auch keine definitive Bedeutung zuzumessen, so genügen sie doch, in Verbindung mit den anderen, um die Ausführbarkeit der Bestimmungen zu dokumentieren und eine gewisse Kontrolle für die Korrektheit der beiden benutzten Abschwächungsverfahren zu geben.

Wir erwähnen an letzter Stelle hier den Punkt, der uns am meisten Schwierigkeit bereitet hat und auch als der erheblichste Übelstand des Apparates zu betrachten ist. Für die Bestimmungen ist gleiche Helligkeit des von dem einen und von dem anderen Kollimator gelieferten Spektrums selbstverständlich nicht erforderlich; indem wir die verschiedenen homogenen Lichter eines Spektrums mit den nämlichen Bestandteilen des anderen vergleichen, finden wir, was wir brauchen, die Verteilung der Rotwerte, Blauwerte etc. innerhalb des ersten Spektrums; die Lichter des zweiten Spektrums spielen dabei nur die Rolle eines willkürlich gewählten Mafsstabes. Erforderlich ist aber natürlich, dafs beide Spektren während des ganzen Versuches dauernd gleiche Helligkeit behalten, oder dafs doch beide in gleichem Verhältnis variieren. Dieser Anforderung nun genügen die Triplexbrenner jedenfalls nicht mit derjenigen Sicherheit und Leichtigkeit, die man wünschen könnte. Läfst man die eine Flamme nur um ein weniges höher oder weniger hoch brennen, so kann man die Helligkeit des betreffenden Feldes sich beträchtlich ändern sehen. Um die Flammenhöhe konstant zu erhalten, fanden wir auch die Anwendung der

Elsterschen Gasregulatoren nicht genügend; vermutlich hängt die Art des Brennens in gewissem Mafse auch von dem Zuge ab, der wieder durch die Erhitzung der Teile mit bedingt wird, kurzum von einigermafsen variablen Momenten. Wir haben schliefslich am sichersten gefunden, den Brenner auf eine bestimmte Flammenhöhe einzustellen, nämlich so, dafs die Flamme eben nicht mehr zum Schornstein herausschlug, und diese Einstellung während der Versuche oftmals zu kontrollieren. Trotz aller diesem Punkte zugewendeten Sorgfalt haben wir aber doch nicht selten in einzelnen Versuchsreihen Abweichungen zu konstatieren gehabt, die wohl nur auf Schwankungen im Intensitätsverhältnis der beiden Lichter zurückgeführt werden können; über die Unsicherheit der einzelnen Einstellung gingen sie erheblich hinaus, betrafen auch eine ganze Reihe von Einstellungen gleichmäfsig; für ihre Zurückführung auf Differenzen im physiologischen Zustande des beobachtenden Auges bot sich keinerlei Anhalt. Aus diesem Grunde war es wünschenswert, die Serie der Bestimmungen, wenn sie in einem Sinne, etwa mit abnehmenden Wellenlängen, ausgeführt war, in der umgekehrten Folge zu wiederholen. Eine Reihe, die solchergestalt bei Hin- und Rückweg durchweg gut stimmende Resultate ergiebt, erscheint natürlich vorzugsweise zuverlässig. Die in Tabelle I gegebenen Werte beruhen auf einer solchen Reihe, bei welcher im Hinweg zwei, im Rückweg nur eine Einstellung gemacht wurde, die durchweg gut übereinstimmten. Wiewohl daher jeder Zahl nur drei Einstellungen zu Grunde liegen, dürfte die Bestimmung genauer sein, als das Gesamtmittel sämtlicher Bestimmungen, wobei die einzelnen Reihen beträchtlichere Abweichungen zeigen. Da wir jedoch auch nicht einen Teil der Beobachtungen nach einem immerhin subjektiven Ermessen unterdrücken mochten, so haben wir die Gesamtmittel in kleinem Druck und eingeklammert hinzugefügt. Im ganzen läfst sich wohl sagen, dafs die Gewinnung der Gleichungen noch nicht diejenige Sicherheit erreicht, die sie bei einer absoluten quantitativen und qualitativen Konstanz der Lichtquellen haben könnte; die dadurch bewirkten Unsicherheiten sind nicht von der Art, dafs sie im Hinblick auf die hier erörterten, theoretisch interessierenden Verhältnisse in Betracht kämen; sie sind aber der Hauptgrund, aus dem wir davon abgesehen haben, durch eine grofse Häufung des Beobachtungsmaterials, d. h.

durch zahlreiche Wiederholung derselben Beobachtungen nach einer gröſseren Genauigkeit der Ergebnisse zu streben. In der That ist es fraglich, ob man dabei nicht durch Kombinierung von Beobachtungen, die unter verschiedenen Bedingungen stehen und zum Teil weniger zuverlässig sind, eher an Genauigkeit einbüſsen würde.

(Aus dem physiologischen Institut Freiburg i. B.)

Über die Wirkung kurzdauernder Lichtreize auf das Sehorgan.

Von

J. v. Kries.

(Hierzu Tafel I.)

Die Wirkung kurzdauernder Lichtreize auf unser Sehorgan ist in letzter Zeit wiederholt zum Gegenstande eingehender Untersuchungen gemacht worden.[1] Dafs hierbei eine Anzahl sehr eigenartiger und nicht ganz einfach deutbarer Erscheinungen auftreten, konnte schon durch die Beobachtungen Purkinjes als festgestellt gelten. Die Untersuchungen der neueren Autoren gehen nicht blofs bezüglich der Deutung, sondern auch bezüglich der Erscheinungen selbst einigermafsen auseinander. Allgemeine Übereinstimmung besteht nur darin, dafs auf die erste Empfindung, welche qualitativ mit derjenigen übereinstimmt, die das betreffende Licht bei längerer Einwirkung erzeugt, sehr bald (d h. etwa um $^1/_5$ Sekunden später) eine zweite, mehr oder weniger lang andauernde, folgt. Dies ist die Grundthatsache, welche, in mancherlei Variierungen beobachtet, auch schon eine Anzahl verschiedener Namen erhalten hat; in Deutschland seit lange unter dem Namen des Purkinjeschen Nachbildes bekannt, hat sie von englischen Autoren, die sie in den 70er Jahren neu fanden, die Benennung der recurrent vision erhalten. Widersprüche bestehen dabei hauptsächlich in Bezug auf zwei Punkte. Die englischen Beob-

[1] Vergl. die in meiner früheren Arbeit (*Zeitschr. f. Psychol.* IX. S. 113, Anmerkung) gegebene Zusammenstellung der Litteratur.

achter, gleichermaſsen auch Hess und Bosscha, sehen diese zweite Helligkeitsempfindung durch ein deutliches Intervall des Dunkels getrennt; Exner konnte eine solchen Zwischenraum nicht bemerken. Bei Anwendung farbiger Lichter ferner beschreiben die meisten Autoren die zweite Empfindung als der Farbe des angewandten Lichtes komplementär. Bidwell findet diese Regel allerdings nicht ganz ausnahmslos und genau zutreffend, doch stimmt mit ihr die Mehrzahl seiner Angaben. Hess dagegen beschreibt das sekundäre Bild als dem primären gleichartig gefärbt. Eine Erklärung dieser doppelten Reaktionsweise des Gesichtsapparates war bis vor kurzem nicht versucht worden. Nachdem aber andere Thatsachen zu der Vermutung geführt hatten, daſs die Zapfen einer- und die Stäbchen andererseits zwei einigermaſsen voneinander unabhängige lichtempfindliche Apparate darstellten, beide zur Auslösung von Empfindungen befähigt, war es nahe gelegt, das primäre Bild als einen durch die Reizung der Zapfen, das verspätete sekundäre als einen durch die Reizung der Stäbchen bewirkten Empfindungseffekt anzusehen. Hierfür schien vor allem der Umstand zu sprechen, daſs, wie Bidwell und ich nahe gleichzeitig fanden, die Erscheinung nur im roten Lichte fehlt, eben jenem, dem gegenüber wir auch aus anderen Gründen die Stäbchen als unerregbar uns denken müssen.

Ein weiteres Studium des Gebietes erschien bei dieser Sachlage zum Teil wegen der eben erwähnten Widersprüche der verschiedenen Autoren erwünscht, zum Teil aber auch im Hinblick auf ein sich gleich aufdrängendes Bedenken. Nach den Beobachtungen Bidwells entsteht die sekundäre Erregung etwa um $1/4$—$1/5$ Sekunden verspätet gegenüber der primären. Man kann bemerken, daſs eine so stark verzögerte Erregung des Stäbchenapparates überall da, wo er allein funktioniert, nämlich in einem schwachen Licht, welches keine Unterscheidung von Farben mehr gestattet, beim „Dämmerungssehen“, wie ich es genannt habe, einen schwerwiegenden Nachteil darstellen würde. Es wird sich Gelegenheit finden, auf diesen Punkt später zurückzukommen. Vorderhand ist klar, daſs eine weitere Untersuchung der Phänomene mit Rücksicht auf theoretische Fragen hauptsächlich darauf zu achten hatte, wie die Erscheinung von der Art und Stärke des benutzten Lichtes und ganz besonders auch, wie sie von dem jeweiligen

Adaptationszustande des Auges abhängt. Namentlich das letztere, bisher wenig beachtete Moment erschien im Hinblick auf die theoretische Vermutung besonders wichtig, da wir die Funktion der Stäbchen in höchstem Maſse uns durch die Adaptation beeinfluſsbar denken müssen.

Was das benutzte Versuchsverfahren angeht, so bin ich zumeist dem von Purkinje, Exner und den englischen Autoren eingeschlagenen Wege gefolgt und habe mit fixiertem Blick ein im Kreise umlaufendes, Licht aussendendes Objekt beobachtet. Das Licht gleitet auf diese Weise über die Netzhaut hin, und man sieht demgemäſs in jedem Augenblicke die einander zeitlich folgenden Phasen des Empfindungseffektes in räumlicher Folge aneinandergeschlossen. Erblicken wir z. B. einen voranlaufenden blauen Kreis, dem, durch ein dunkles Intervall getrennt, ein heller, schwach gelblicher Schweif folgt, so können wir diesem sehr sicher zu beurteilenden Phänomen ohne weiteres entnehmen, daſs das blaue Licht bei kurzer Einwirkung auf eine Netzhautstelle eine Blauempfindung erzeugt, dann nach einem gewissen Intervall des Dunkels eine zweite Helligkeitsempfindung mit gelblicher Färbung ausgelöst hat. Das Zeitintervall beider Effekte ist, wenn gleichzeitig der eine auf der Stelle *a* und der andere auf der Stelle *b* des Gesichtsfeldes gesehen wird, demjenigen Zeitwerte gleich zu setzen, während dessen das Objekt von der Stelle *a* bis zur Stelle *b* hinläuft. Mir scheint die Beobachtung durch diese räumliche Auseinanderlegung eine gröſsere Sicherheit zu gewinnen als sie bei der Momentanreizung einer einzelnen Netzhautstelle er reichen kann, der kontinuierliche umlaufende Lichtreiz also im Allgemeinen den Vorzug vor dem einfachen Momentanreiz zu verdienen.

Im übrigen schloſs sich mein Versuchsverfahren fast genau dem von Bidwell geübten an. In der Thür zweier Dunkelzimmer wurde eine runde Öffnung angebracht, die von der einen Seite her mit dem Lichte der elektrischen Bogenlampe, eventuell durch Entwerfung eines reellen Spektrums mit farbigem Lichte erleuchtet werden konnte. Das die Öffnung passierende Licht fiel im anderen Zimmer zunächst auf ein achromatisches Objektiv, sodann auf einen Spiegel, so daſs auf einem passend aufgestellten weiſsen Schirm ein reelles Bild der Öffnung entworfen wurde; der Spiegel konnte um eine gegen seine Normale etwas geneigte Achse in Umdrehung versetzt werden, wobei

das reelle Bild auf dem Schirm eine Kreisbahn beschrieb. Die Rotation des Spiegels besorgte ein kleiner Elektromotor mit Zentrifugalregulierung, gewöhnlich so, dafs eine Umdrehung 1,5 Sekunden erforderte. Die erwähnten objektiven Spektren wurden ebenso wie die weifse Beleuchtung durch das elektrische Bogenlicht gewonnen, was mit Benutzung eines geradsichtigen Wernickeschen Prismas mit grofser Leichtigkeit geschehen konnte; doch sei bemerkt, dafs ich in vielen Fällen auch farbige Gläser, unter Verzicht auf die spektrale Zerlegung, verwendet habe, um die Farben von gröfserer Lichtstärke zu erhalten. Sodann ist noch zu erwähnen, dafs in dem Schirme eine kleine Öffnung angebracht war, welche, von hinten her mit einer Milchglasplatte verdeckt und von einer sehr kleinen Gasflamme beleuchtet, ein passendes Fixationszeichen abgab. Eine kleine Verschiebung des rotierenden Spiegels erlaubt, die von dem Lichtbilde durchlaufene Bahn gegen die Fixationsmarke zu verschieben, so dafs diese nach Belieben in der Mitte derselben, an den Rand etc. fiel, Verhältnisse, auf die sogleich genauer einzugehen sein wird.

Ehe ich an die Erörterung des Punktes gehe, dessen Aufklärung ich mir hauptsächlich vorgesetzt hatte, nämlich, wie die fraglichen Erscheinungen von dem Adaptationszustande des Auges abhängen, will ich eine bisher nicht bemerkte Eigentümlichkeit des Phänomens beschreiben. Wenn sich dasselbe in der, namentlich von den englischen Autoren beschriebenen Form präsentiert, dafs das Nachbild durch ein ziemlich langes dunkles Intervall getrennt hinter dem primären Bilde herläuft,[1] und wenn man alsdann seine Bahn so legt, dafs sie durch das Fixationszeichen geht, so ist in auffälligster Weise zu bemerken, dafs das Nachbild (der „ghost“) in der nächsten Umgebung des Fixationspunktes verschwindet. Ich bin nicht durch theoretische Erwägung auf diese Beobachtung geführt worden, bemerkte vielmehr eigentlich zufällig eine eigentümliche Diskontinuität, etwas sozusagen Sprungweises in der Bewegung des Nachbildes. Bei genauerer Beobachtung stellte sich sogleich heraus, dafs dasselbe einen kleinen Bezirk am Fixationspunkte überspringt. Die Erscheinung ist unter günstigen Bedin-

[1] Die Bedingungen für diese Art der Erscheinung werden unten angegeben werden.

gungen sehr leicht zu sehen und ungemein deutlich; es gehört dazu, wie gesagt, daſs das Nachbild gut entwickelt und von dem primären Bilde durch ein möglichst langes dunkles Intervall getrennt ist; auch darf die Rotationsbewegung nicht zu schnell sein. So ist sie von mehreren Kollegen, denen ich sie zu zeigen Gelegenheit hatte, in ganz gleicher Weise wie von mir gesehen worden. Man hat, wie es einer derselben sehr treffend ausdrückte, den Eindruck, als ob das Bild in einem kleinen Abstande vom Fixationspunkte in einen Tunnel schlüpfte, aus dem es jenseits des Fixationspunktes wieder herausfährt.

Nachdem das Springen des sekundären Bildes in der Nähe des Fixationspunktes einmal nachgewiesen war, erschien es von Wichtigkeit, die Gröſse desjenigen Bezirkes zu ermitteln, der der Duplizität des Erregungseffektes ermangelt und über den also das sekundäre Bild hinwegzuhüpfen scheint. Der Versuch lehrte indessen sogleich, daſs die Bestimmung auf diese Weise, mit der Methode des umlaufenden Bildes, sehr unsicher und ungenau ist. Ich versuchte, auf den weiſsen Schirm, auf den das umlaufende Bild projiziert war, und der eine kleine, von hinten erleuchtete Öffnung als Fixationszeichen trug, das reelle Bild einer kleinen Lichtöffnung zu projizieren und dieses auf denjenigen Punkt in der Nähe des Fixierzeichens einzustellen, wo der „ghost“ zu verschwinden schien. Doch war das Verfahren so schwierig und unsicher, daſs ich keine brauchbaren Resultate erhalten konnte. Sehr gut gelangte ich dagegen zum Ziel, indem ich auf das umlaufende Bild ganz verzichtete. Vor der das Licht liefernden Öffnung rotierte eine Scheibe mit einem Schlitz, so daſs die Öffnung einmal in 1½—2 Sekunden für einen kleinen Bruchteil einer Sekunde sichtbar wurde. In den ersten Orientierungsversuchen, die ich selbst anstellte, war das reelle Bild der Öffnung auf eine weiſse Tafel projiziert und konnte leicht in variable Entfernung von dem daselbst angebrachten Fixierzeichen gebracht werden. Hier war nun vortrefflich zu sehen, daſs, wenn das aufblitzende Bild sich in gröſserer Entfernung vom Fixierpunkte befand, jedem Aufblitzen des blauen Bildes ein zweites Aufleuchten in kurzem Intervall folgte. Sobald dagegen das Bild nahe an den Fixationspunkt fiel, war hiervon nichts zu bemerken. Um die Grenze zu bestimmen, verfuhr

ich bei diesen ersten Versuchen so, daſs ich dem kreisförmigen Bilde eine Gröſse von 1 cm Durchmesser und 4 cm Abstand vom Fixationspunkte gab. Ich wechselte dann meine Entfernung und bestimmte denjenigen Abstand, in den ich gehen muſste, um die Doppelschlägigkeit der Erregung verschwinden zu machen. Ich fand diese Abstände, wenn das Objekt horizontal neben dem Fixationszeichen stand, in verschiedenen Versuchen zwischen 172 und 211 cm, im Durchschnitt 184 cm, ohne sicheren Unterschied zwischen nasaler und temporaler Seite; bei Lage des Objektes über oder unter dem Fixierpunkt war ein Abstand von 212 cm erforderlich. Berechnet man unter der Voraussetzung, daſs in diesen Fällen noch das ganze Objekt auf stäbchenfreiem Gebiete abgebildet worden ist, so ergäbe sich die Gröſse desselben derart, daſs es, auf 1 m projiziert, einen horizontalen Durchmesser von 55, einen vertikalen von 47 m haben würde.

Empfehlenswert ist es für diese Versuche, niemals sehr starke Dunkeladaptation eintreten zu lassen, weil dadurch die Doppelschlägigkeit aus den alsbald zu erörternden Gründen an Deutlichkeit verliert. Ferner mag erwähnt werden, daſs man wohl gelegentlich einmal zweifelhaft wird, ob nicht auch zentral eine Duplizität des Vorganges stattfindet; beobachtet man genau, so findet man, daſs es die beiden schnell folgenden Veränderungen, Erhellung und Verdunkelung, sind, welche den unbestimmten Eindruck einer Duplizität hervorrufen. Es empfiehlt sich deswegen, von Zeit zu Zeit den Blick abzuwenden und sich durch Vergleichung wieder die charakteristische Erscheinung des zweiten Aufleuchtens vorzuführen. Instruktiv ist es auch, das Fixierzeichen in die Mitte des intermittierend aufleuchtenden kreisförmigen Objektes zu bringen. Man sieht dann, daſs bei Betrachtung aus gröſserer Entfernung die Doppelschlägigkeit vollkommen fehlt; nähert man sich dem Objekte, so bemerkt man sehr deutlich, daſs das zweite Aufleuchten zunächst nur am Rande auftritt, im allgemeinen einen schmalen sichelförmigen Streifen darstellend.

Um von subjektiven Präokkupationen unabhängig zu sein, veranlaſste ich Herrn Dr. Pertz, eine Reihe ähnlicher Bestimmungen auszuführen. Das Verfahren war dabei ein etwas abweichendes; um möglichst hohe Lichtstärken in Anwendung bringen zu können, wurde eine im Fensterladen angebrachte,

mit Mattglas und einem blauen Glase verdeckte Öffnung direkt betrachtet. Dicht vor der Öffnung rotierte die verdeckende Scheibe mit ihrem Spalt. Der Abstand des Beobachters betrug 1 m, der Durchmesser der Öffnung 5 mm. Unmittelbar vor dem Auge des Beobachters war ein mikroskopisches Deckgläschen angebracht, welches das virtuelle Bild eines sehr kleinen und ganz schwach leuchtenden Glühlämpchens in die Nähe der Öffnung warf. Das Lämpchen war an einem horizontalen Arme drehbar befestigt, so daſs sein Spiegelbild, sich horizontal verschiebend, über die Lichtöffnung hinglitt und in kleinen oder gröſseren Abstand von dieser gebracht werden konnte. Der Beobachter hatte in wiederholten Versuchen diejenige Stellung des Lämpchens aufzusuchen, für welche bei Fixation desselben noch sicher k e i n e Doppelerregung zu bemerken war. Die Bestimmungen gelangen mit verhältnismäſsig groſser Genauigkeit und guter Übereinstimmung. Es ergab sich vom Fixationspunkt bis zu dem ihm abgekehrten Rande der Öffnung in einer ersten Reihe:

a) bei lateraler Lage der Lichtöffnung 18,5—26,5, im Mittel 22 mm,

b) bei medialer Lage der Lichtöffnung 13,5—18,5, im Mittel 15,5 mm;

in einer zweiten Reihe:

a) bei medialer Lage 19,5—24,5, im Mittel 20,8 mm,

b) bei lateraler Lage 12,5—17,5, im Mittel 14,8 mm.

Dürften wir annehmen, daſs bei der hier ermittelten Grenze das Netzhautbild der Öffnung sich noch ganz auf stäbchenfreiem Gebiete abbildet, so könnten wir also den Durchmesser dieses Bezirkes, auf 1 m Entfernung projiziert, auf etwa 35—38 mm veranschlagen, was mit den anatomischen Thatsachen in genügender Übereinstimmung ist.[1]

Ich wende mich nunmehr zu der Besprechung des Einflusses, den die Adaptationszustände des Auges auf die fragliche Erscheinung ausüben. Es sei vorausgeschickt, daſs dieser Einfluſs in der That ein auſserordentlich groſser ist. Das eine Extrem hätten wir, wenn das Auge vollkommen hell adaptiert ist. Es möge also in dem zur Beobachtung dienenden Dunkelzimmer sonst alles vorbereitet und in Gang gesetzt, die Läden

[1] Vergl. hierüber die Erörterungen in der vorangehenden Arbeit, *Zeitschr. f. Psychol.* Bd. XII. S. 29.

jedoch noch offen sein; der Beobachter stehe auch nahe am Fenster, so dafs die Augen dem vollen Tageslicht ausgesetzt sind. In wenigen Sekunden können alsdann die Läden heruntergelassen werden und die Beobachtung des umlaufenden Lichtbildes beginnen. Man sieht alsdann, wenn das angewandte Licht sehr hell ist, sogleich, bei etwas geringerer Lichtstärke aber nach ganz kurzer Zeit (1—2 Minuten), diejenige Form der Erscheinung, welche am charakteristischsten der Bezeichnung der englischen Autoren (recurrent vision) entspricht, nämlich das sekundäre Bild, von dem primären durch ein beträchtliches ganz dunkles Intervall getrennt, hinter ihm herlaufen. Wendet man nicht sehr starke Lichter an, so ist, wie gesagt, die Erscheinung nicht gleich im ersten Moment sichtbar; sie entwickelt sich in einigen Minuten. Man sieht dabei in einer gewissen Entfernung von dem primären Bilde zunächst eine besonders tiefe Schwärze; in dieser tritt zuerst ein unbestimmter heller Schein auf, welcher demgemäfs von einem tief schwarz erscheinenden Hofe umgeben ist. Bald gewinnt das sekundäre Bild an Helligkeit und Deutlichkeit und wird auch zugleich länger. Anfangs nur ein schmaler Streifen, der hinter der Ausdehnung des primären Bildes noch zurückzubleiben scheint, streckt es sich in die Länge, wobei sein hinteres Ende, in einen langen Schweif verwandelt, nach hinten zu sehr unbestimmt begrenzt wird. Dabei sehe auch ich (ganz in Übereinstimmung mit Bidwell) die tiefe Schwärze als einen nicht scharf begrenzten Hof, der das sekundäre Bild einfafst, und zwar vorn sowohl als seitlich.

Diese, wenn ich so sagen darf, schönste und eleganteste Erscheinung der recurrent vision habe ich versucht in Figur 1 darzustellen. Einige Besonderheiten sind an derselben noch hervorzuheben. An dem vorauslaufenden (primären) Bilde ist oft in sehr auffälliger Weise zu sehen, dafs sein hinterer Rand konkav, das ganze Bild also halbmondförmig erscheint. Dies würde darauf hindeuten, dafs der kurze Lichtreiz an jeder Netzhautstelle eine Erregung bewirkt, deren Dauer nicht im einfachen Verhältnis mit der Dauer des Lichtreizes wächst, so dafs insbesondere ihr Ende nicht einfach überall um den gleichen Wert nach dem Ende der Beleuchtung stattfindet.

Was sodann die Farbe der sekundären, verspäteten Bilder anlangt, so habe ich sie stets schwach komplementär oder

wenigstens nahezu komplementär gefärbt gesehen; ich notierte bei Anwendung spektraler Lichter bei einwirkendem Licht Orange das nachlaufende Bild als bläulich, bei Grünlichgelb schön blau, bei Gelblichgrün blauviolett, bei Blaugrün schön rosa, bei Blau gelb, bei Violett schwach gelblich oder grünlich. Einzig bei blauem Licht konnte die Färbung zuweilen zweifelhaft sein und (besonders bei sehr starkem Licht) auch das sekundäre Bild bläulich erscheinen. Diese Abweichung von der Regel dürfte wohl daher zu erklären sein, daſs an sich die durch Stäbchenerregung ausgelöste Empfindung nicht genau farblos, sondern leicht bläulich zu sein scheint, somit die komplementäre Gelbfärbung unter besonders ungünstigen Bedingungen steht.

Es wird jetzt zunächst zu betrachten sein, wie die Erscheinung von der Intensität des einwirkenden Lichtes abhängt, wobei im Auge zu behalten wäre, daſs das Gesagte sich auf kurze Dunkeladaptation (4—10 Minuten) bezieht. Hier ist nun anzuführen, daſs, um das Phänomen in der geschilderten Weise hervorzubringen, das einwirkende Licht selbstverständlich nicht zu schwach, aber auch nicht zu stark sein darf. Schwächt man während der Beobachtung das Licht ab, so erlischt alsbald das sekundäre Bild, und zwar lange ehe das primäre unsichtbar wird. Macht man den Versuch mit sehr intensivem Lichte, so erhält man gleichfalls eine andere Form der Erscheinung. Man sieht nämlich jetzt das primäre Bild weit mehr in die Länge gezogen, und das sekundäre schlieſst sich ihm direkt an. Dies ist etwa die Erscheinungsweise, welche Exner beschrieben und abgebildet hat; die gleiche bekam auch ich bei den ersten Orientierungsversuchen zur Anschauung, deren ich früher kurz Erwähnung that und bei denen das in einer Kugel gespiegelte Licht eines Auerbrenners als Objekt diente.[1] Bei der Projizierung eines Lichtbildes habe ich so hohe Lichtstärken nicht erreichen können, wohl aber das Gleiche auch jetzt wieder beobachtet, wenn ich das leuchtende Diaphragma nicht auf dem Schirm abbilden lieſs, sondern direkt im Spiegel betrachtete. Wenn ich solche Lichtstärken wähle, daſs der gelbliche Schweif fast die ganze Kreisbahn

---

[1] *Über den Einfluſs der Adaptation auf Licht- und Farbenempfindung und über die Funktion der Stäbchen.* Freiburg i. B. 1894. S. 11.

ausfüllt, so ist auch das primäre Bild bereits so weit nach hinten erstreckt, dafs es den Beginn des sekundären erreicht. Hierbei ist noch eines zu beachten. Bei zunehmender Dunkeladaptation des Auges wächst (wovon gleich noch zu reden sein wird) ohnehin die Erstreckung des primären Bildes. Es kann daher kommen, wie ich es oft gesehen habe, dafs man zunächst das sekundäre Bild deutlich getrennt von dem primären sieht, nach einiger Zeit die Bilder verschmolzen scheinen, dann aber eine Verminderung der Lichtstärke genügt, um das sekundäre wieder in deutlichem Abstand auftreten zu sehen.

Die Frage, weshalb einige Beobachter ein dunkles Intervall zwischen dem primären und sekundären Bilde beschreiben, andere nicht, läfst sich hiernach mit genügender Sicherheit beantworten. Wer mit gut dunkeladaptiertem Auge und intensiven Lichtern arbeitet, wird das Intervall vermissen; wer mit geringerer Dunkeladaptation und schwächeren Lichtern operiert, wird es finden.

Was das Zeitintervall des primären und sekundären Bildes anlangt, so ist eine genaue Bestimmung desselben schwierig. Die Schätzung des Bogenabstandes der beiden Bilder ist sehr unsicher und gewinnt auch nicht viel, wenn man, wie ich zunächst that, ein kleines Lichtzeichen auf einem Kreisbogen verschieblich anordnet und in solchen Abstand vom Fixationspunkte zu bringen sucht, dafs er dem Abstande der beiden Bilder gleichkommt, resp. so, dafs das sekundäre Bild jenes Signal in dem gleichen Augenblick erreicht, wo das primäre Bild am Fixierpunkte vorbeigleitet. Bessere Resultate erzielt man schon durch die bekannte Registriermethode, wie sie z. B. zur Darstellung der Zeitdifferenz der Herztöne viel benutzt worden ist. Man schlägt mit einem Metallstift auf eine Messingplatte so auf, dafs die beiden Geräusche möglichst genau mit den Zeitpunkten zu koinzidieren scheinen, in welchen das primäre und das sekundäre Bild am Fixierpunkte vorbeigleiten. Weitaus am genauesten ist aber ein anderes Verfahren. An dem rotierenden Spiegel selbst kann man eine Vorrichtung treffen, vermöge deren bei jedem Umlauf zwei kurze Anschläge hörbar werden. Ein an dem Spiegel angebrachter und mit ihm umlaufender Vorsprung streift über zwei federnde Plättchen hin; dieselben werden dabei ein wenig niedergedrückt, und es kann auf diese Weise zugleich ein elektrischer Kontakt kurz

unterbrochen werden. Die Träger nun, an denen jene Plättchen befestigt sind, lassen sich (etwa wie beim Differentialrheotom) längs der Kreisperipherie verschieben. So kann man es nun ganz wohl und mit relativ grofser Genauigkeit dahin bringen, dafs der erste Anschlag dann gehört wird, wenn das primäre, der zweite dann, wenn das sekundäre Bild am Fixationspunkte vorbeiläuft. Auf diese Weise läfst sich wenigstens das mit Sicherheit konstatieren, dafs die Zeitdifferenz zwischen dem Beginn des primären und dem Beginn des sekundären Bildes mit zunehmender Lichtstärke sich vermindert. Bei nicht sehr starkem Licht konnte ich das Intervall bis auf 1/4 Sekunde ansteigen sehen, und hiermit ist zugleich der höchste Wert der Verzögerung bezeichnet, den, soweit ich finde, die sekundäre Erregung gegenüber der primären erfahren kann. Mit Benutzung gröfserer Lichtstärken konnte ich das Intervall bei dem gleichen Adaptationszustande auf etwa 1/6 Sekunde vermindern und hätte es wohl noch weiter vermindern können, wenn nicht alsdann die Verlängerung des primären Bildes und die damit verbundene Reduzierung des dunklen Intervalls die Bestimmung erschwerte. Mit zunehmender Dunkeladaptation nimmt das in Rede stehende Zeitintervall, wenn man die Lichtstärke unvermindert erhält, auch ab. Doch kann ich darüber keine bestimmten Angaben machen, weil die niemals über längere Zeiten ganz konstante Lichtstärke der Bogenlampe sich hier als störende Fehlerquelle geltend machte.

Die Erscheinung kann in der oben beschriebenen Form, wie gesagt, bei hell- oder schwach dunkeladaptiertem Auge gesehen werden. Zum Verständnis des Folgenden wird es am dienlichsten sein, wenn ich sogleich das entgegengesetzte Extrem schildere. Dies entspricht einer sehr hochgradigen Dunkeladaptation, und ich betone, dafs, wenn man das Phänomen in der nunmehr zu schildernden Art sicher beobachten will, die im allgemeinen für maximale Adaptation ausreichende Dauer von einer halben Stunde nicht genügt; es ist wünschenswert, mindestens zwei Stunden die Augen vor Lichteinfall zu schützen. Bei diesem Augenzustande nun ist die Erscheinung völlig verändert. Eine recurrent vision ist gar nicht zu sehen; dagegen sieht man im unmittelbaren Anschlufs an das primäre Bild einen, je nach der angewandten Lichtstärke längeren oder kürzeren, glänzend weifsen Streifen.

Ich habe diese Erscheinung, wiederum für blaues Licht, in Figur 2 abzubilden versucht; man beachte, daſs das Blau hier auf eine schmale vorauslaufende Sichel reduziert ist, welche in der That tief farbig erscheint, während gleich dahinter das glänzende Weiſs die Farbe nahezu oder ganz verdeckt. Die übrigen Farben, wiederum mit alleiniger Ausnahme des Rots, zeigen ganz das Gleiche. In Vergleich zu demjenigen Phänomen, welches bei helladaptiertem Auge beobachtet wird, scheint also hier einerseits etwas Neues hinzu, andererseits etwas in Fortfall gekommen zu sein. Es schien mir zunächst wichtig, festzustellen, ob letzteres wirklich der Fall sei. Man konnte nämlich auch denken, daſs vielleicht der durch die lange Adaptation neuaufgetretene leuchtende Schweif das sekundäre Bild nur überdecke und vermöge seiner überwiegenden Helligkeit unbemerkbar mache. Es lieſs sich in sehr einfacher Weise feststellen, daſs dies nicht der Fall ist, sondern das sekundäre Bild wirklich durch die lange Dunkeladaptation fortfällt. Wenn man nämlich nur ein Auge in diesen Zustand versetzt und abwechselnd mit dem einen und dem anderen Auge beobachtet, so sieht man sehr deutlich mit dem einen den hellen weiſsen Schweif, mit dem anderen das sekundäre Bild. Beobachtet man alsdann binokular, so sieht man in groſser Deutlichkeit b e i d e s. Dabei ist oft zugleich bemerklich, daſs der weiſse Schweif sich gar nicht bis an diejenige Stelle hin erstreckt, welche das sekundäre Bild einnehmen würde, sondern eine kürzere Erstreckung hat. Hieraus scheint mir zu folgen, daſs die analoge Erscheinung, wenn sie im dunkeladaptierten Auge in ähnlicher Weise und besonders im gleichen Zeitintervall aufträte, auch sichtbar sein müſste.

Die nächstliegende Deutung dieser Thatsache wird offenbar die sein, daſs durch die lange fortgesetzte Dunkeladaptation die Reaktionsweise der Stäbchen sich so modifiziere, daſs nicht nur die S t ä r k e ihrer Reaktion wächst, sondern zugleich auch die Promptheit, oder daſs die anfänglich bedeutende Verzögerung, mit der sie in Erregung geraten, mit zunehmender Adaptation immer geringer wird. In der That spricht die genauere Betrachtung auch der zuletzt beschriebenen Erscheinung ganz dafür, daſs der weiſse Schweif der Erregung der Stäbchen seine Entstehung verdankt. Auch hier tritt das Weiſs mit einer deutlichen, wenn auch freilich nur noch geringen Ver-

zögerung gegenüber der farbigen Erregung auf; dies macht sich in der, den vorderen Rand des primären Bildes ausmachenden tieffarbigen Sichel bemerkbar. Da diese Erscheinung sich bei Lichtern jeder beliebigen Farbe (mit alleiniger Ausnahme des roten) wiederfindet, so wird man sich wiederum zu der Annahme eines mit geringer Verspätung reagierenden und bei jeder Reizung die gleiche farblose Helligkeitsempfindung liefernden Apparates gedrängt sehen, wobei das Fehlen im roten Licht auch wiederum auf die Stäbchen hinweist.[1]

Ich darf nicht unterlassen, an dieser Stelle zu bemerken, daſs die zuletzt erörterten Erscheinungen sich mit einer Anzahl schon von anderen Autoren beschriebener und zum Teil wohlbekannter Dinge decken, und daſs diese in der That aus dem Zeitverhältnis der Stäbchen- und Zapfenerregung sich sehr gut erklären. Es sind die sog. „flatternden Herzen", die hier anzuführen sind. Allerdings können gewiſs die Scheinverschiebungen verschiedenfarbiger, rasch hin und her bewegter Objekte gegeneinander durch sehr mannigfache Umstände bedingt sein, und ich will keineswegs bestreiten, daſs die von Schapringer u. A. gegebenen physikalischen Erklärungen für gewisse Fälle zutreffen. Zum Teil aber handelt es sich auch um ganz andere Dinge, und namentlich das, was Szili beschrieben hat, steht mit den vorhin angeführten Erscheinungen in genauester Beziehung. Ich werde auf seine Angaben sogleich noch zurückkommen. Will man die Dinge in der theoretisch durchsichtigsten Weise zur Anschauung bringen, so befestige man auf der mattschwarzen Scheibe eines Farbenkreisels ein rotes und ein blaues Quadrat von 1 cm Seite und beobachte bei so herabgesetzter

---

[1] Das Fehlen an der Stelle des deutlichsten Sehens ist freilich hier, wo der Schweif sich dem primären Bilde unmittelbar anschlieſst, schwieriger zu sehen. Doch kann man sich auch davon ganz wohl überzeugen. Ich fand es dazu am vorteilhaftesten, dem laufenden Lichtbilde die Gestalt eines Streifens zu geben, der z. B. horizontal liegt und den Fixationspunkt vertikal aufsteigend passiert. Überdies hält man zweckmäſsig einen Schirm mit seinem oberen horizontalen Rande derart vor die Augen, daſs der blaue Streifen erst dicht am Fixationspunkte dahinter auftaucht. Alsdann sieht man recht gut, daſs das blaue Bild rechts und links zwei weiſse Schwänze hinter sich herzieht, welche gegen den Fixationspunkt zu unscharf begrenzt sind, diesen aber selbst frei lassen. Erst etwas über dem Fixationspunkte erstreckt sich der weiſse Schein von rechts nach links kontinuierlich.

Beleuchtung, dafs das Rot noch gut sichtbar und in seiner Farbe erkennbar, das Blau exzentrisch gut sichtbar ist, bei direkter Fixation dagegen verschwindet. Angenehm ist für diesen Versuch, wenn man im Beobachtungszimmer etwa mit Hülfe zweier Lichtöffnungen, deren eine mit rotem, die andere mit blauem Glase bedeckt ist, die Stärke der roten und der blauen Beleuchtung unabhängig voneinander regulieren kann. Hat man sich in der angegebenen Weise ein nur stäbchen-sichtbares Blau hergestellt und läfst dann die Scheibe langsam rotieren, so bemerkt man, wie der vordere Rand des roten Feldes dem des (farblos erscheinenden) blauen um einige Millimeter voraneilt. Fafst man den Farbenkreisel mit der Hand derart, dafs man ihn kurze Hin- und Herdrehungen ausführen lassen kann, so ist das gleiche Zurückbleiben des lichtschwachen Blaus hinter dem Rot wahrzunehmen, und eben hierdurch entsteht der Eindruck des „Flatterns“ in der frappantesten Weise. Befestigt man einfach auf einem schwarzen Täfelchen ein rotes und ein blaues Scheibchen und macht mit dem Täfelchen kurze Bewegungen, so ist das nämliche zu beobachten. Will man das Flattern mit Benutzung eines farbigen Objektes auf andersfarbigem Hintergrunde gut sehen, so ist es erforderlich, zwei Farben zu wählen, die möglichst ungleiche Stäbchenvalenz haben, und es so einzurichten, dafs das eine keine Farbenempfindung hervorruft. In der That sieht man, dafs in all den von Szili angegebenen Kombinationen die Stäbchenvalenz von Objekt und Grund sehr verschieden ist.

In besonders interessanter Weise finde ich aber diejenigen Beobachtungen Szili's mit dem auch von mir Gesehenen im Einklange, welche sich auf etwas gröfsere Lichtstärken beziehen. Ich führe als vorzugsweise beachtenswert den nachfolgenden Passus an:

„Wenn ich diese Tafel (roter Grund mit kreisrunder grüner Scheibe) etwa in einem Meter Entfernung von der Kerzenflamme vor mir halte, indem ich meinen Blick auf die grüne Scheibe richte, so bemerke ich bald über der letzteren einen hellen glanzähnlichen Schimmer, welcher mit den leisesten Schwankungen meiner Hand oder meines Blickes erzittert. Bewege ich die Tafel in mäfsigem Tempo und in kurzen Abweichungen in ihrer Ebene hin und her, dann bleibt dieser Schimmer als zusammenhängendes zweites Bild der Scheibe

offenbar mit meinem nicht rasch genug folgenden Auge zurück. Am besten kann ich daher die Erscheinung beobachten, wenn ich bei dem Versuche womöglich die gleiche Blickrichtung beibehalte. Beim Hin- und Herbewegen schiebt sich bald rechts, bald links von der wirklichen Scheibe ein sichelförmiges Stück dieses zweiten Bildes über den roten Grund, während am entgegengesetzten Rande ein ebensogroſses sichelförmiges Stück der Scheibe selbst von dem Schimmer frei wird. Wenn ich bei diesem Versuche meine Aufmerksamkeit auf die Vorgänge an immer demselben Rande der Scheibe gerichtet halte, so erscheint mir das zurückbleibende sichelförmige Stück des zweiten Bildes ganz untrüglich in der Farbe des roten Grundes, jedoch viel heller als dieser; hingegen sehe ich das Stück der Scheibe selbst, welches bei der Bewegung jenem zweiten Bilde vorauseilt, in ihrer ursprünglichen grünen Farbe, aber wesentlich dunkler, als der von dem Schimmer bedeckte Teil der Scheibe."[1]

Man sieht, Szili kommt lediglich durch die Analyse dieser Erscheinung auch geradezu zu der Annahme eines mit einiger Verspätung auftretenden farbloshellen Bildes der grünen (ebenso einer blauen) Scheibe.

Wer die Erscheinung eines blauen Quadrates, welches auf schwarzer Scheibe des Farbenkreisels befestigt ist und mit dieser langsam umläuft, mit Aufmerksamkeit beobachtet, wird die Richtigkeit der Szilischen Beschreibung bestätigen und den vorauslaufenden tiefblauen Rand wahrnehmen, sofern er mit geringen Lichtstärken und einigermaſsen dunkeladaptiertem Auge arbeitet. Bei weitem frappanter ist freilich die Erscheinung, wenn man, in der oben geschilderten Weise, im Dunkelzimmer einen umlaufenden, ziemlich lichtstarken, farbigen Fleck beobachtet, nachdem das Auge etwa eine Viertelstunde oder länger für dunkel adaptiert worden ist. Gewiſs aber ist, daſs meine oben mitgeteilten Beobachtungen sich zum Teil mit denjenigen Szilis decken, und daſs, die Richtigkeit unserer Deutung vorausgesetzt, auch diese letzteren auf das zwischen Zapfen- und Stäbchenreaktion bestehende Zeitverhältnis zurückzuführen sein werden.

Im ganzen wird es hiernach als eine nicht unwahrscheinliche Vorstellung erscheinen, daſs die Stäbchen mit zunehmen-

---

[1] *Zeitschr. f. Psychol.* III. S. 362.

der Adaptation immer stärker und immer schneller reagieren, und auf diese Weise die eine Erscheinungsart ihrer Thätigkeit in die andere übergeht. So einfach und ansprechend aber eine solche Vorstellung auch erscheinen mag, so glaube ich doch, daſs die genauere Betrachtung nötigt, sie abzuweisen und eine kompliziertere an ihre Stelle zu setzen. Wir können, um das Resultat sogleich vorauszuschicken, der Annahme nicht ausweichen, daſs Empfindungen unter Vermittelung des Stäbchenapparates in zwei verschiedenen Modis ausgelöst werden können, welche sich bezüglich ihrer zeitlichen Verhältnisse unterscheiden und von denen der eine, stark verzögerte, im helladaptierten oder doch nur schwach dunkeladaptierten Auge besonders stark bemerkbar ist, bei sehr langer Dunkeladaptation aber schwindet, der andere dagegen (weit weniger verzögerte) mit zunehmender Dunkeladaptation immer stärker hervortritt.

Der Grund für diese Annahme liegt zunächst darin, daſs, wenn man die allmähliche Modifikation der Erscheinungen bei zunehmender Dunkeladaptation verfolgt, keineswegs die eine Erscheinungsform dergestalt in die andere übergeht, daſs das sekundäre Bild dem primären immer näher rückte und dabei an Helligkeit gewönne. Es verhält sich in der That nicht so; sondern schon nach einigen Minuten der Dunkeladaptation, während das sekundäre Bild in groſser Deutlichkeit und Schönheit getrennt sichtbar ist, sieht man an dem primären den weiſsen Schweif sich entwickeln. Es ist auch hier besonders instruktiv, das eine Auge helladaptiert zu lassen, das andere etwa zehn Minuten lang dunkel zu halten. Beobachtet man dann abwechselnd mit dem einen und dem anderen, so ist der Unterschied in der Erscheinung des primären Bilde äuſserst auffällig, das helladaptierte sieht das blaue Bild in der Art des in Figur 1 dargestellten. Das mäſsig dunkeladaptierte sieht es dagegen in der Erscheinung der Figur 2, wenn auch noch nicht in stärkster Entwickelung, so doch schon mit groſser Deutlichkeit; es kann kein Zweifel sein, daſs dieser Teil der ganzen Erscheinung schon durch die kurze Adaptierung stark modifiziert ist; daneben aber besteht das verspätete sekundäre Bild noch ganz deutlich. Hier bestehen also, wie man sagen kann, beide Stäbchenfunktionen, die wenig und die stark verzögerte, deutlich nebeneinander.

Der andere Grund ist der folgende. Wenn man bei mäfsig dunkeladaptiertem Auge ein z. B. blaues Licht so weit abschwächt, dafs dasselbe zentral unsichtbar ist und überhaupt nur farblos gesehen wird, also, wie wir annehmen dürfen, nur die Stäbchen erregt, so ist seine Wirkung gegenüber derjenigen eines roten Lichtes zwar merklich verzögert, aber nicht entfernt um denjenigen Betrag ($^1/_5$ Sek.), den wir erwarten müfsten, wenn die hier zur Geltung kommende Stäbchenerregung identisch wäre mit derjenigen, die sonst das sekundäre Bild lieferte. Stellt man sich zwei Bilder her, die miteinander umlaufen, ein rotes und ein blaues, und richtet die Lichtstärke des blauen in der oben erwähnten Weise ein, so sieht man allerdings das farblose Bild des lichtschwachen Blaus um ein weniges hinter dem roten Bilde herlaufen, wenn die Objekte genau neben- oder übereinander stehen; aber die Verschiebung ist gering, sie erreicht niemals auch nur entfernt den Wert jenes grofsen Abstandes, um den die recurrent vision getrennt erscheint.[1] Verstärkt man das blaue Licht, so sieht man dieses wenig verspätete Bild allmählich Farbe gewinnen, und, ohne seine Stellung zu dem roten sehr erheblich zu ändern, allmählich in die uns bekannte Form des primären Bildes übergehen, während gleichzeitig in bedeutendem Abstande das sekundäre Bild aufzutreten beginnt. Hiermit steht auch ganz in Übereinstimmung, dafs (wie die Herren Dr. Nagel und Breuer fanden) bei Anwendung von zentral unsichtbaren, lichtschwachen blauen Lichtern als Signalen keineswegs besonders stark verlängerte Reaktionszeiten gefunden wurden. Die Versuche sind, da im wesentlichen nur dies negative Resultat interessierte, nicht weiter fortgesetzt worden; mit Sicherheit aber ergeben sie, dafs zwischen der Anwendung roter und (nur stäbchensichtbarer) blauer Lichter, und zwar bei mäfsig dunkeladaptiertem Auge, kein sehr grofser Unterschied, jedenfalls entfernt keiner von $^1/_5$ Sekunde besteht.

Es ist hiernach klar, dafs bei der Beobachtung mit mäfsiger Dunkeladaptation schon in dem primären (vorderen) Bilde eine Beteiligung der Stäbchenfunktion angenommen werden mufs.

[1] Nach den oben erwähnten Versuchen, bei denen nebeneinander ein rotes und ein (nur stäbchensichtbares) blaues Objekt auf schwarzer Scheibe rotieren, möchte ich die Verzögerung der farblosen Empfindung gegenüber der roten nur auf etwa $^1/_{50}$ Sekunde taxieren.

Hierdurch löst sich die ganz zu Anfang beregte Schwierigkeit; in der That kommt der Stäbchenerregung eine so starke Verspätung (welche anzunehmen man aus allgemeinen Gründen Bedenken tragen müfste) nicht allgemein zu, sondern nur unter besonderen Bedingungen. Auf der anderen Seite aber mufs man ohne weiteres zugestehen, dafs die Erklärung der sekundären Bilder hiermit jene Einfachheit einbüfst, welche sie auf den ersten Blick zu gestatten schien. Die Duplizität der Erregung schien völlig begreiflich, wenn man durchweg in der ersten die Thätigkeit des einen, in der zweiten die des anderen Apparates erblicken durfte. Müssen wir (und das ist, wie ich glaube, der Fall) den Stäbchen die Fähigkeit zuschreiben, bei momentaner Reizung zwei zeitlich auseinanderfallende Empfindungseffekte zu liefern, so stehen wir doch wieder vor einem Problem. Natürlich drängen sich mancherlei Vermutungen darüber auf, wie sich dasselbe vielleicht lösen wird. Mancher wird geneigt sein, an die Zersetzung des Sehpurpurs einer- und des Sehgelbs andererseits zu denken. Ein anderer Gedanke wäre der, dafs nach allem, was man über die Bildung des lichtempfindlichen Stoffes weifs, ein Vorkommen desselben nicht blofs in den Stäbchen, sondern auch aufserhalb derselben angenommen werden kann, und dafs die verspätete Erregung vielleicht auf einer Wirkung des Lichtes auf diesen letzteren Anteil beruhen könne. Hierbei wird dann nicht blofs an eine sekundäre Wirkung auf die Stäbchen zu denken sein, sondern es könnte eventuell sogar auch eine ähnliche auf die Zapfen ausgeübte in Erwägung zu ziehen sein. Denn es ist ja klar, dafs die Umstände, die uns zunächst veranlafsten, das sekundäre Bild auf die Stäbchen zu beziehen, sein Fehlen im roten Lichte und auf der Fovea, sich gleich gut auch verstehen liefsen, wenn es sich überhaupt um eine Wirkung des Sehpurpurs handelte. Beruht vielleicht die wenig verzögerte Weifsempfindung auf der direkten Erregung der Stäbchen mittelst des in ihnen angesammelten Sehpurpurs, die stark verzögerte auf einer Erregung der Zapfen durch den nicht in ihnen, sondern nur in ihrer Umgebung angesammelten Sehstoff?[1]

---

[1] Bei dieser Auffassung wird sich verstehen lassen, weshalb nur das stark verzögerte Bild komplementär gefärbt erscheint. Ferner spricht zu ihren Gunsten auch eine Thatsache, die ich um so weniger unerwähnt lassen möchte, als sie meinen im voraus gehegten Erwartungen widersprochen hat. Eine total Farbenblinde, die ich kürzlich zu untersuchen

Für eine Beantwortung dieser Fragen wird wohl die sehr eigenartige Abhängigkeit der verspäteten sekundären Bilder von der Adaptation ganz besonders zu berücksichtigen sein. Günstigste Bedingung für die recurrent vision ist in der That das Verweilen im hellen Licht mit darauffolgender kurzer Dunkeladaptation. Denkt man sich, dafs die Bildung des Sehpurpurs, die sekretorische Thätigkeit des Pigmentepithels durch die Belichtung des Auges angeregt wird, so begreift man, dafs, wenn das Auge verdunkelt wird, der Vorrat dieses Körpers zunächst, wegen der fortfallenden Zerstörung bei noch lebhafter Bildung, anwächst, allmählich aber bei nachlassender Thätigkeit der secernierenden Elemente wieder mehr und mehr abnimmt.[2] Aber auch an andere Vorgänge, namentlich die Vor- und Rückwanderung des Pigments, kann natürlich gedacht werden.

Niemand wird bestreiten und niemand wird sich darüber wundern, dafs wir uns hier noch im ungewissen bewegen. Ich möchte betonen, dafs auch in einer anderen Beziehung, nämlich hinsichtlich der Färbung der sekundären Bilder, wir zunächst nur zu einigermafsen unbestimmten und weitere Fragen involvierenden Vorstellungen gelangen können. Mit dem, was wir sonst wissen, wird es im Einklang sein, dafs in dem trichromatischen Apparat alsbald nach Beendigung des farbigen Lichtreizes ein negativ komplementäres Nachbild entsteht. Man darf nicht übersehen, dafs, wenn wir die Färbung des nachlaufenden Bildes hierauf zurückführen, dabei doch die Art und

---

Gelegenheit hatte, konnte die nachlaufenden Bilder nicht wahrnehmen. Die recht gute Beobachtungsfähigkeit des Mädchens macht es unwahrscheinlich, dafs sie es lediglich übersehen haben sollte; immerhin wird die Bestätigung an anderen Fällen abzuwarten sein. Fehlt aber die recurrent vision wirklich bei dem nur mit Stäbchen ausgerüsteten Sehapparate des total Farbenbenblinden, ebenso, wie an der nur Zapfen führenden Fovea des Normalsehenden, so bliebe in der That kaum etwas anderes übrig, als die Erscheinung auf irgend ein Zusammenwirken beider Apparate zurückzuführen.

[2] Die Bedeutung des voraufgegangenen Aufenthaltes im Hellen für die recurrent vision hat sich uns im Laufe fortgesetzter Beobachtungen mit immer gröfserer Deutlichkeit herausgestellt. Wir fanden stets bei länger ausgedehnten Beobachtungen, dafs es vorteilhaft ist, den Aufenthalt im Dunkelzimmer zu unterbrechen, sich für kurze Zeit in volle Tagesbeleuchtung zu begeben und dann wieder nach einem Dunkelaufenthalt von nur wenigen Minuten zu beobachten.

Weise, wie hier beide Apparate zur Erzeugung einer Empfindung zusammenwirken, ungewiſs bleibt. In meiner ersten Mitteilung habe ich den Ausdruck gebraucht, daſs das von den Stäbchen herrührende positive mit dem negativ-komplementären der Zapfen „verschmilzt“, um damit in möglichst allgemeiner Weise anzudeuten, daſs der Empfindungseffekt als ein kombiniertes Ergebnis beider Thätigkeiten aufzufassen ist. Wie sie sich aber kombinieren, das scheint mir vorderhand auch noch fraglich. Es wird um so weniger angezeigt sein, sich in der Erörterung von Möglichkeiten zu verlieren, als hier Fragen vorliegen, zu deren Beantwortung eine passend geführte Untersuchung der Umstimmungserscheinungen wohl Angriffspunkte bieten wird. Interessant ist jedenfalls, daſs der dem primären Bilde sich direkt anschlieſsende Schweif, wie er bei guter Dunkeladaptation gesehen wird, rein weiſs, oder schwach gleichfarbig, niemals komplementär gesehen wird.

Die Unbestimmtheit des theoretischen Ergebnisses wird, wie ich hoffe, nicht die ganze obige Mitteilung als gegenstands- und nutzlos erscheinen lassen. In der That haben wir kaum über die gleich zu Anfang sich ergebende Vermutung hinausgelangen können, daſs das nachlaufende Bild irgendwie unter Beteiligung der Stäbchen oder des Sehpurpurs zu stande komme, und wir muſsten hierfür sogar noch mannigfaltigere Möglichkeiten in Betracht ziehen, als zu Anfang vermutet werden konnte. Als Hauptsache erschien mir aber, einige neue Thatsachen angeben zu können, nämlich das Fehlen des Phänomens am Fixationspunkte und seine ausführlicher geschilderte Abhängigkeit von der Adaptation. In theoretischer Beziehung läſst sich wohl erwarten, daſs sich das ganze Erscheinungsgebiet noch fruchtbarer erweisen wird, wenn unsere Kenntnisse auch in anderen Beziehungen vervollständigt sein werden. Auch gegenwärtig aber verdient es wohl mehr Beachtung, als es bis jetzt gefunden hat. Ich erinnere an die an anderer Stelle mitgeteilte, vorläufig auch noch vereinzelte Beobachtung, daſs einem mit Hemeralopie Behafteten das nachlaufende Bild in keiner Weise sichtbar gemacht werden konnte. Weitere Ermittelungen über individuelle Unterschiede oder pathologische Modifikationen der Erscheinungen könnten wohl von Interesse sein. Ich kann in dieser Richtung nur noch anführen, daſs ein Dichromat (Dr. NAGEL) die Dinge genau wie ich selbst sah, allein mit dem

Unterschiede bezüglich der Färbung, die sich aus seiner Farbenblindheit selbstverständlich ergaben.

Erklärung der Tafel.

Die Bilder stellen die Erscheinung eines im dunkelen Gesichtsfelde in kreisförmiger Bahn umlaufenden blauen Kreises (bei fixiertem Blick) dar, und zwar Fig. 1 bei helladaptiertem Auge oder nach Dunkelaufenthalt von nur wenigen Minuten, Fig. 2 nach sehr langer Dunkeladaptation (mehr als zwei Stunden). Die schwarzen Kreislinien sind in der Tafel nur zur Erläuterung beigefügt und bezeichnen die vom blauen Bilde durchlaufene Bahn, gehören aber nicht zum Phänomen. Bemerkt sei noch, dafs die Darstellung der Erscheinung im Farbendruck selbstverständlich zu wünschen übrig läfst. Doch giebt die Abbildung eine gewisse Vorstellung von der Sache und wird es jedenfalls dem, der die Versuche wiederholt, erleichtern, das von mir Gesehene wiederzuerkennen.



(Aus dem physiologischen Institut zu Freiburg i. B.)

Über Farbensysteme.

Von

J. v. Kries.

Mit 6 Figuren im Text.

I.

Wenn ich im Folgenden nach einer längeren Reihe von Jahren auf gewisse früher behandelte Fragen wieder zurückkomme, so wird eine Vorbemerkung darüber am Platze sein, weshalb und von welchem Standpunkte aus dies geschieht. Hinsichtlich der sogenannten dichromatischen Farbensysteme oder partiellen Farbenblindheiten, und besonders auch hinsichtlich ihrer Beziehung zu dem normalen trichromatischen Farbensystem stehen sich, wie bekannt, die von der Young-Helmholtzschen und die von der Heringschen Theorie ausgehende Auffassung gegenüber. Dieser Gegensatz bleibt in vollem Maſse selbst dann von Bedeutung, wenn man der einen oder anderen dieser Theorien auch nur in beschränkterem Sinne Gültigkeit zuzugestehen geneigt ist, ja selbst unter Absehung von theoretischen Vorstellungen überhaupt; denn er bezeichnet sehr erhebliche Meinungsverschiedenheiten bezüglich der thatsächlichen Verhältnisse, wie das sehr klar schon in der Annahme resp. Verneinung eines typischen Unterschiedes zwischen Rot- und Grünblinden zum Ausdruck kommt. Während vor mehr als 20 Jahren die Mehrzahl der Untersucher sich der Helmholtzschen Auffassung zugeneigt haben dürfte, auch ich selbst mich in diesem Sinne damals ausgesprochen habe,[1] ist dann in

[1] v. Kries und Küster, Über angeborene Farbenblindheit. *Arch. f. Physiol.* 1879. S. 513.

Ferner v. Kries, *Die Gesichtsempfindungen und ihre Analyse.* Leipzig 1881. S. 145.

neuerer Zeit unter dem Einfluſs der Heringschen Publikationen in weiten Kreisen die andere Anschauung bevorzugt worden. Nun bin ich niemals der Ansicht gewesen, daſs in den neueren Beobachtungen über das Sehen der Dichromaten vollgültige Beweise für diese letztere Auffassung zu erblicken wären. Wenn ich gleichwohl längere Zeit hindurch mich über den Gegenstand nicht geäuſsert habe, so hatte dies seinen besonderen Grund. Er lag darin, daſs durch die Beobachtungen von Hering und Hillebrand[1] eine neue, auch für die Auffassung der Farbenblindheiten sehr belangreiche Thatsache aufgedeckt worden war. Der Farbentüchtige, so fanden sie, bei sehr geringem Licht und mit gut adaptiertem Auge sehend, sieht ganz ebenso wie der total Farbenblinde, nämlich Alles farblos, und dabei in einer von der gewöhnlichen stark abweichenden Helligkeitsverteilung. Ohne Zweifel wurde hierdurch wahrscheinlich gemacht, daſs unter diesen Umständen nur ein bestimmter Teil des Sehorgans funktioniere, nämlich eben derjenige, den der total Farbenblinde noch allein besitzt; und es lag nahe, hierin die schwarzweiſse Sehsubstanz Herings in typischer und deutlicher Isolierung zu erblicken, um so mehr, da sich einsehen lieſs, daſs die Dunkeladaptierung im wesentlichen die Lichtwirkungen auf diese begünstigen müsse. Lag aber hier die Isolierung eines nur der farblosen Helligkeitsempfindung dienenden Organteils scheinbar ganz deutlich vor, so war dann die Annahme weiterer Komponenten, die den farbigen Bestimmungen zu dienen hätten und im wesentlichen mit den von Hering angenommenen übereinstimmen muſsten, kaum mehr zu umgehen, trotz der Schwierigkeiten, welche sich bei der Durchführung dieser Anschauung aus der spezielleren Natur der den Farbenblinden eigentümlichen Verwechselungsgleichungen ergaben. Allmählich indessen hat sich durch die Arbeiten von König, Parinaud und mir selbst[2] mit groſser Wahr-

---

[1] Hillebrand, Über die spezifische Helligkeit der Farben (mit Vorbemerkungen von E. Hering). *Sitzungsber. d. Wien. Akad. Math.-naturw. Kl.* XCVIII. S. 70. 1889.

[2] A. König, Über den menschlichen Sehpurpur und seine Bedeutung für das Sehen. *Sitzungsber. d. Berl. Akad.* 1894. S. 577.

v. Kries, *Über den Einfluſs der Adaptation auf Licht- und Farbenempfindung und über die Funktion der Stäbchen.* Freiburg 1894. Ferner: Über die Funktion der Netzhautstäbchen. *Diese Zeitschr.* IX. S. 81.

scheinlichkeit herausgestellt, daſs die Dinge doch nicht so einfach liegen, und daſs die erwähnten Beobachtungen von Hering und Hillebrand ganz anders zu deuten sind. Nach der von mir vertretenen Anschauung — eine ausführliche Auseinandersetzung wird an dieser Stelle nicht erforderlich sein — hätten wir uns neben dem trichromatischen Apparat und von ihm in der Hauptsache unabhängig einen monochromatischen d. h. total farbenblinden im Auge angeordnet zu denken, und dieser, vorzugsweise adaptationsfähig, würde beim sogenannten Dämmerungssehen, d. h. dem Sehen des dunkel-adaptierten Auges bei schwachem Licht, ausschlieſslich funktionieren. Haben wir in dem Sehen des total Farbenblinden, ebenso in unserem eigenen Sehen bei dunkel-adaptiertem Auge und herabgesetzter Beleuchtung die ausschlieſsliche Thätigkeit dieses Dunkel-Apparates vor uns, so werden damit die Aufschlüsse hinfällig, welche uns diese Verhältnisse in Bezug auf die Gliederung des trichromatischen farbentüchtigen Apparates zu geben schienen.

Im ganzen kann man daher sagen, daſs nach der Klarstellung dieser, durch Herings Beobachtungen in den Mittelpunkt des Interesses gerückten Erscheinungen (Dämmerungssehn, Purkinjesches Phänomen, totale Farbenblindheit) die Lehre von den dichromatischen Farbensystemen sich wieder auf dem nämlichen Standpunkt befand wie vorher, und daſs der Versuch, über die Gliederung des trichromatischen Apparates durch ein genaueres Studium jener Erscheinungen etwas zu erfahren, nach genau denselben Prinzipien unternommen resp. fortgesetzt werden konnte, welche schon früher für die Untersuchungen von Helmholtz, Maxwell, Donders, für diejenigen von mir und Küster, neuerdings die von König, und für zahlreiche andere maſsgebend gewesen waren. Eine kurze Erörterung dieser Prinzipien wird sogleich noch zu geben sein; vorher ist nur noch ein Punkt zu berühren, in dem die Entwickelung der Stäbchentheorie allerdings eine Modifikation der hier einzuhaltenden Verfahrungsweisen forderte. Können wir es als sicher annehmen, daſs die Farbentüchtigen und die Farbenblinden sich hinsichtlich ihres Hellapparates unterscheiden, daſs aber die Dunkelapparate in

---

Parinaud, La sensibilité de l'oeil aux couleurs spectrales; fonctions des éléments rétiniens et du pourpre visuel. *Ann. d'ocul.* CXII. S. 228. 1894.

allen Fällen mit grofser Annäherung übereinstimmend sich verhalten, so ist klar, dafs alles darauf ankommen wird, die optischen Funktionen unter Umständen zu prüfen, welche eine möglichst ausschliesliche Funktion des Hellapparates garantieren. Dagegen werden Beobachtungen, bei denen eine kombinierte Funktion beider Apparate anzunehmen ist, naturgemäfs weniger leicht deutbar und zur theoretischen Analyse weniger geeignet sein, schon aus dem Grunde, weil uns gegebenen Falls doch jeder Anhalt dafür fehlt, um zu beurteilen, in welchem Verhältnis beide Apparate beteiligt sind, ja sogar die Möglichkeit, dieses Verhältnis in successiven Versuchen oder bei verschiedenen Personen ähnlich herzustellen. Aus diesem Grunde ist jedenfalls vorläufig die Untersuchung der extremen Fälle, in denen wir möglichst reine Thätigkeit des Hell- resp. des Dunkelapparates annehmen können, am meisten zu empfehlen. Demgemäfs sind denn die Beobachtungen, über die nachstehend berichtet wird, alle mit hell-adaptiertem Auge und auf kleinem Felde (etwa $1^3/_4{}^0$ Durchmesser) gemacht. Sie sind Hellgleichungen in demselben Sinne, wie die entsprechenden, über die ich früher mit Nagel (*diese Zeitschrift* XII. S. 1 f.) berichtet habe.

Was nun den Grundgedanken der Untersuchung angeht, so ist derselbe durch die hauptsächlich in Betracht kommenden theoretischen Auffassungen des trichromatischen Apparates insoweit gegeben, dafs gewisse Fragen als vorzugsweise interessierende sogleich festgestellt und die Hauptaufgaben danach angegeben werden können. Da trotz öfter verschiedener Darstellung hierüber auch im wesentlichen Einstimmung herrscht, so wird es genügen, diese Grundgedanken hier ganz kurz zu erläutern. Geht man nämlich von dem allen Komponententheorieen gemeinsamen Grundgedanken aus, dafs der Sehapparat sich aus einer beschränkten Zahl von Bestandteilen zusammensetzt, durch deren verschiedene Bethätigung die Verschiedenheiten unserer Gesichtsempfindungen in Bezug auf Helligkeit und Farbe bestimmt werden, so wird offenbar die nächstliegende Frage in Bezug auf die beschränkteren Farbensysteme die sein, ob man dieselben sich aus dem normalen durch das einfache Fehlen eines gewissen Bestandteils entstanden denken kann. Dies ist ohne Zweifel die einfachste Beziehung, die z. B. zwischen dem dichromatischen und dem trichromatischen System stattfinden kann. Es ist, wie bekannt, auch diejenige, welche

sowohl von Helmholtz im Sinne seiner Theorie wie von Hering im Sinne der seinigen angenommen resp. behauptet worden ist. Die theoretische Bedeutung eines solchen Verhältnisses liegt alsdann darin (wie ebenfalls von diesen beiden Autoren ganz übereinstimmend angenommen worden ist), dafs, falls in der That die partielle Farbenblindheit gegenüber dem normalen Farbensinn eine reine Ausfallerscheinung darstellt, aus den Beziehungen beider Systeme sich sogleich eine gewisse Charakterisierung des fehlenden Bestandteiles ableiten läfst. Im übrigen ist bekannt, in welcher Weise sich die Gültigkeit der in Rede stehenden Beziehung in den Beobachtungen darstellen mufs. Dem Dichromaten werden, wenn er sich vom Farbentüchtigen nur durch den Mangel eines Bestandteiles unterscheidet, diejenigen Lichtgemische, die dem Farbentüchtigen gleich erscheinen, durchweg auch gleich erscheinen müssen. Daneben aber müssen ihm auch alle diejenigen Lichter gleich erscheinen, welche für den Farbentüchtigen sich nur bezüglich ihrer Wirkung auf jenen dem Dichromaten fehlenden Organteil unterscheiden. Zur Feststellung des in Rede stehenden Verhältnisses wäre also im Grunde nur erforderlich zu ermitteln: erstens, ob in der That das System ein dichromatisches ist (der Eindruck jedes beliebigen Lichtes durch die Mischung von zwei passend gewählten Lichtern hervorgerufen werden kann), und zweitens, ob in Strenge der Satz gilt, dafs Farben, die dem Farbentüchtigen gleich erscheinen, auch von dem Dichromaten für gleich gehalten werden. Ganz das Entsprechende würde, mutatis mutandis, auch für den total Farbenblinden gelten. Es handelt sich also, um für das Auseinandergesetzte einen kurzen Ausdruck festzuhalten, darum, ob wir uns die Farbenblindheiten gegenüber dem normalen Farbensinn als reine Ausfallserscheinung, ob wir uns die verschiedenen Farbensysteme aus dem normalen durch Reduktion entstanden denken dürfen.

Die eben gegebene Darlegung trifft sachlich genau zusammen mit der von König seinen Untersuchungen zu Grunde gelegten, auf deren mathematische Formulierung daher hier nur kurz hingewiesen zu werden braucht. Bekanntlich kann die Gesamtheit der für den Farbentüchtigen geltenden Mischungsgleichungen durch die Angabe dreier Funktionen der Wellenlänge dargestellt werden, welche angeben, welche Mengen

der drei für die Mischungen gewählten Lichter der Mengeneinheit der betreffenden Wellenlänge gleich erscheinen. Die betreffenden Funktionen sind deswegen von der Wahl der in den Mischungen benutzten Lichter abhängig, und können bei Wahl anderer Lichter durch drei andere ersetzt werden. Dabei muſs jedoch, sofern das Newtonsche Farbenmischungsgesetz gültig ist, jede neue Funktion eine homogene lineare Funktion der drei der anderen Darstellung angehörigen sein. Das Gleiche gilt wiederum für das dichromatische System. Ist nun letzteres aus dem trichromatischen durch Reduktion entstanden, so muſs dies darin ersichtlich werden, daſs die dem normalen System angehörigen Kurven eine Darstellung gestatten, bei welcher ihrer zwei mit denjenigen des dichromatischen Systems zusammenfallen, mit anderen Worten, daſs sich die Funktionen des dichromatischen Systems mit zwei linearen Funktionen von denjenigen des trichromatischen decken. Dies ist, wie man sieht, der mathematische Ausdruck für die generelle Gültigkeit des Satzes, daſs die den Trichromaten gleich erscheinenden Lichter auch für die Dichromaten gleich sind.

Die obige Darstellung weicht, wie weiter hervorzuheben ist, auch von einer ähnlichen Herings[1] nur scheinbar ab. Immerhin muſs ich auf diese letztere hier kurz eingehen. Wenn wir zunächst in Frage bringen, ob die dichromatischen und das monochromatische System einfache Reduktionen des normalen sind, so ist damit auf die theoretisch wenigstens gegebene Möglichkeit hingewiesen, daſs sich dies etwa anders verhalte. Eben diese Möglichkeit führt auch Herings eben erwähnte Darlegung aus, in welcher qualitative und quantitative Modifikationen der optischen Reizwerte unterschieden werden.

„Allen rein quantitativen Anomalien," sagt Hering (a. a. O. S. 309 f.), ist gemeinsam, daſs ein homogenes Licht von nur quantitativ anomalem Reizwerte dieselbe Empfindung erweckt, die es auch dem normalen Auge, für welches es normalen Reizwert hat, dann erwecken würde, wenn seine Energie schon vor dem Eintritt ins Auge entsprechend vermindert oder vermehrt wäre."

---

[1] Hering, Über einen Fall von Gelb-Blau-Blindheit. *Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol.* LVII. S. 308.

„Von den quantitativen Anomalien unterscheiden sich die qualitativen dadurch, dafs sie durch Änderungen der Lichtenergie nicht korrigiert werden können. Das anomale Auge erhält daher von den homogenen Lichtern im allgemeinen Empfindungen, welche dem normalen Auge nur durch Licht anderer Wellenlänge oder durch bestimmte zusammengesetzte Lichter erzeugt werden, letzteres z. B. dann, wenn jedes homogene Licht dem anomalen Auge eine farblose Empfindung erweckt (totale Farbenblindheit,) ersteres dann, wenn homogenes violettes Licht dem anomalen Auge blau erscheint (Rot-Grünblindheit). . . . . .

Qualitative Anomalien des Farbensinnes sind hiernach darin begründet, dafs eine oder beide farbig wirkenden Urvalenzen relativ zu den anderen herabgesetzt sind, und zwar für alle homogenen Lichter in demselben Verhältnis; gänzlicher Ausfall einer farbig wirkenden Urvalenz bedingt partielle, gänzlicher Ausfall beider farbig wirkenden totale Farbenblindheit."

Übertragen wir dies in eine veränderte Terminologie, und zwar der Art, dafs, was mir doch klarer und bedeutungsvoller erscheint, nicht von den Modifikationen der optischen Reizwerte der Lichter sondern von den Modifikationen der Sehsubstanzen ausgegangen wird, so bemerken wir, dafs die von H. sogen. qualitativen Anomalien alle diejenigen Fälle umfassen, in denen eine Sehsubstanz fehlt, und auch wohl diejenigen, in denen eine Sehsubstanz (ohne qualitative Veränderung) nach Mafs und Wirksamkeit reduziert ist, alle diejenigen Fälle also, die wir auf rein quantitative Modifikationen der Sehsubstanzen zurückführen können, und welche theoretisch als vollkommen verständlich gelten dürfen. Die von Hering sogenannten quantitativen Anomalien sind dagegen von anderer Art. Wenn z. B., wie in dem dort erörterten Falle angenommen wird, die Reizwerte der kurzwelligen Lichter relativ zu den Reizwerten der langwelligen kleiner sind als für das normale Auge, (was Hering eine quantitative Anomalie nennt), so liegt darin offenbar eine, ihren Gründen nach zunächst nicht aufklärbare qualitative Modifikation der Sehsubstanzen, durch welche eben das Verhältnis ihrer Erregbarkeiten gegenüber verschiedenen Lichtern modifiziert ist. Ich würde hiernach vorziehen, wo Hering von einer quali-

tativen Anomalie der optischen Reizwerte[1] spricht, von einer quantitativen Anomalie des Sehorgans resp. seiner Bestandteile zu reden, und umgekehrt. Dies hervorzuheben schien mir deshalb wichtig, weil in der HERINGschen Darstellung nicht bemerklich wird, einen wie grofsen Unterschied es für die Theorie macht, ob wir zur Erklärung der Farbenblindheit (in HERINGS Bezeichnung) qualitative oder quantitative Modifikationen anzunehmen haben. Wir müssen aber betonen, dafs eigentlich nur, wenn sich die Farbenblindheit als Ausfallserscheinung darstellt, von einer so einfachen und befriedigenden Erklärung aus der Theorie gesprochen werden darf, dafs die betreffenden Erscheinungen selbst wieder der Theorie zur Stütze dienen können. Müssen wir daneben noch Modifikationen der optischen Substanzen annehmen, von denen sich keinerlei Rechenschaft ablegen läfst, so kann man im Grunde doch nur sagen, dafs die Theorie den betreffenden Erscheinungen gegenüber versagt, wenn sie sich auch vielleicht nicht gerade in Widerspruch mit ihnen setzt.

Einiges wenige ist, ehe ich an die Mitteilung der Beobachtungen gehe, noch kurz zu erledigen. Zunächst ein Punkt: die Nomenclatur. Die Untersuchungen haben, wie hier im Voraus angeführt sei, ergeben, dafs die alte Unterscheidung der Rot- und Grünblinden eine unentbehrliche, und dafs auch die theoretische Auffassung berechtigt ist, nach der wir uns aus dem normalen Sehorgan durch Fehlen eines Bestandteiles die eine, durch Fehlen eines andern die andere Form der Farbenblindheit entstehen denken. Gleichwohl ist die Bezeichnung Rotblindheit und Grünblindheit keine glücklich gewählte und sie ist die Quelle endloser Mifsverständnisse gewesen. Ich möchte daher vorschlagen, sie durch Benennungen zu ersetzen, welche das Wesentliche kenntlich machen, ohne falsche Auffassungen nahe zu legen. Dieser Anforderung dürfte am besten ein fremdsprachiger Ausdruck genügen, der das Fehlen eines ersten resp. zweiten Bestandteiles bedeutet, und ich will daher die Rotblinden „P r o t a n o p e n“ die Grünblinden „D e u t e r a n o p e n“ nennen.[2]

---

[1] HERING spricht übrigens gelegentlich auch von einer quantitativen Anomalie des Farbensinnes (z. B. a. a. O. S. 312 unten), was dann wohl noch leichter mifsverstanden werden kann.

[2] Die Gründe für die Einführung der neuen Bezeichnungen wird man in den nachstehend mitgeteilten Thatsachen und besonders in den Erörterungen in Abschnitt VI finden. Ich hätte im Grunde Worte vor-

Sodann ist hier ein Punkt zu berühren, der sowohl bei der Ausführung als bei der Beurteilung der Versuche besondere Beachtung erheischte, nämlich die „individuellen Verschiedenheiten“ des Farbensinnes. Es kann wohl gegenwärtig als sicher gelten, dafs individuelle Verschiedenheiten zum Teil, wie wir kurz sagen dürfen, in rein physikalischer Weise, nämlich durch die ungleiche Lichtabsorption in gefärbten Medien des Auges, besonders dem Pigment des gelben Flecks, bedingt werden. Derartige Differenzen sind natürlich in Hinblick auf die eigentlichen optischen Substanzen als etwas Accidentelles und Nebensächliches zu betrachten; sie könnten aber, sobald sie beträchtliche Grade erreichen, für die Untersuchung aufserordentlich erschwerend werden, ja die strikte Beantwortung der gestellten Fragen event. ganz unmöglich machen. Ist nun auch dies, wie die Erfahrung lehrt, thatsächlich nicht der Fall, so ist doch jedesmal die Erörterung geboten, ob sich irgendwelche Unterschiede etwa auf die Verhältnisse der absorbierenden Medien zurückführen lassen. Abgesehen hiervon wird auch die Möglichkeit im Auge zu behalten sein, dafs etwa die Sehorgane verschiedener farbentüchtiger Personen auch in anderen wirklich physiologischen Beziehungen sich voneinander unterscheiden, was ja, unbeschadet des Umstandes, dafs alle trichromatisch wären, recht wohl der Fall sein könnte. Die obige Betrachtung ging von dem normalen trichromatischen System wie von einem festen Ausgangspunkt aus. Der sichere Boden, auf den diese Untersuchung gestellt schien, könnte auch dadurch ins Wanken kommen, dafs es verschiedene Formen trichromatischer Systeme giebt. Bekanntlich ist König geneigt, gewisse zuerst von Lord Rayleigh, dann von Donders, dann von ihm selbst beobachtete Fälle in diesem Sinne zu nehmen; er hat sie als anomale trichromatische Systeme bezeichnet.[1] Da die Beobachtungen

---

gezogen, welche lediglich das Fehlen eines ersten oder zweiten Bestandteils bedeuteten, während die Endung ... anopen, indem sie das „Nichtsehen“ anzeigt, meinem Wunsche schon nicht ganz entspricht. Indessen hat es weder mir noch einem mich freundlichst beratenden philologischen Kollegen gelingen wollen, brauchbare Wortbildungen dieses Sinnes zu stande zu bringen.

[1] König und Dieterici, Über die Grundempfindungen und ihre Intensitätsverteilung im Spektrum. *Zeitschr. f. Psychol.* IV. S. 280 f.

Rayleigh, *Nature.* XXV. p. 64. 1882.

Donders, Farbengleichungen. *Arch. f. Physiol.* 1884. S. 518.

über diesen Punkt noch wenig zahlreich sind, überdies, wie es scheint, Hering geneigt ist, auch diese Differenzen auf das Makula-Pigment zurückzuführen. so war es geboten, auch diesem Gegenstande die Aufmerksamkeit zuzuwenden.

Für den allgemeinen Gang der Versuche wäre nun im Grunde der einfachste Modus der gewesen, daſs durch systematische Darstellung der Mischungsgleichungen die Farbensysteme der Farbentüchtigen, der Dichromaten etc. festgelegt worden wären, und es könnte daran die auf rein rechnerischem Wege zu beantwortende Frage geknüpft werden, ob sich die betreffenden Funktionen der dichromatischen Systeme als lineare Funktionen von denjenigen des trichromatischen Systems darstellen lassen. Ich habe jedoch diesen Weg, wiewohl seine mathematische Eleganz auf den ersten Blick einladend erscheint, doch nur zum Teil verfolgt. Für die Dichromaten nämlich konnte ohne Schwierigkeit so verfahren werden, wie dies von König und seinen Mitarbeitern und wie es auch von Nagel geschehen ist, so nämlich, daſs zu einer passenden Reihe homogener spektraler Lichter die gleich erscheinende Mischung eines lang- und eines kurzwelligen Lichtes aufgesucht wurden. Dagegen stöſst für die Farbentüchtigen die Durchführung eines analogen Verfahrens wenigstens mit den zur Zeit verfügbaren Hülfsmitteln auf groſse Schwierigkeiten. Da nun ein Teil der vom Farbentüchtigen zu gewinnenden Gleichungen wegen des relativ bedeutenden Einflusses, den hier die individuellen Verschiedenheiten der Makula-Tingierung gewinnen, ohnehin von geringerer Bedeutung ist und das Hauptinteresse sich auf einen gewissen relativ einfacher zu behandelndem Teil konzentriert, ist es mir zulässig erschienen die Beobachtung der Farbentüchtigen nur mit einiger Einschränkung durchzuführen; auſserdem habe ich aber in vielen Fällen die Beziehungen zu den Dichromaten durch einen direkten Vergleich, nämlich durch gleichzeitig resp. alternierend ausgeführte Beobachtungen klar zu legen versucht. Wie zu diesem Zwecke verfahren wurde, wird im Gange der Darstellung mitzuteilen sein.

Ich erfülle endlich noch eine angenehme Pflicht, indem ich den zahlreichen Herren, Farbentüchtigen wie Farbenblinden, welche mich durch die Ausführung von Beobachtungen unterstützten, besonders den vier Herren Dichromaten, denen ich die systematischen Beobachtungen des folgenden Abschnitts ver-

danke, für ihre ausdauernde und vielfach mühevolle Mitwirkung meinen aufrichtigen Dank sage.

II.
Dichromatische Farbensysteme. Hellgleichungen.

Systematische Beobachtungen der Mischungsgleichungen habe ich aufser von Herrn Dr. NAGEL noch von drei anderen Dichromaten erhalten, von denen einer, Dr. STARK, ebenso wie NAGEL dem grünblinden (deuteranopischen) Typus, die Herren Stabsarzt SEHRWALD und stud. med. MARX, dem rotblinden (protanopischen) Typus angehören. Der Gang der Versuche war hier in jeder Beziehung derselbe, wie er in der Arbeit von NAGEL und mir für die Hellgleichungen angegeben worden ist.[1] Es sei nur kurz daran erinnert, dafs für jedes homogene Licht die Gemische eines langwelligen Lichtes (bei den Protanopen 589,2 bei den Deuteranopen 645 $\mu\mu$) und eines kurzwelligen (in allen Fällen 460,8 $\mu\mu$) eingestellt wurden, welche dem homogenen Lichte genau gleich erschienen.[2] Die im Gemisch erforderlichen Mengen des lang- und des kurzwelligen Lichtes können wir als die Rot- resp. Blauwerte (*W*- und *K*-Werte nach der Benennung von DONDERS) eines Lichtes bezeichnen, deren Gröfsen also unsere Beobachtungen als Funktionen der Wellenlängen und zwar für das Dispersionsspektrum des Gaslichtes darstellen würden.

Die folgende Tabelle I stellt die Resultate dieser Beobachtungen zusammen. Sie enthält im ersten Stabe die spektralen Orte und Wellenlängen der homogenen Lichter, im zweiten, dritten, vierten und fünften die Ergebnisse der von den Herren NAGEL, STARK, SEHRWALD und MARX gemachten Einstellungen, und zwar so, dafs die Rotwerte in der linken Hälfte des Stabes mit stehenden Zahlen, die Blauwerte in der rechten Hälfte mit liegenden (kursiv) eingetragen sind.

---

[1] Über den Einflufs von Lichtstärke und Adaptation auf das Sehen des Dichromaten (Grünblinden). *Zeitschr. f. Psychol.* XII. S. 1.

[2] Niemals, wie hier zur Vermeidung von Irrtümern nochmals besonders betont sei, handelte es sich um die Herstellung gleicher Helligkeit bei ungleicher Farbe oder ungleicher Sättigung. Die Bestimmungen waren also von jedem unsicheren subjektiven Element so sehr als nur denkbar befreit.

Tabelle I.

Spektraler Ort und Wellenlänge des homogenen Lichtes	Beobachter Dr. Nagel		Beobachter Dr. Stark		Beobachter Dr. Sehrwald		Beobachter stud. Marx	
	Rot-werte	Blau-werte	Rot-werte	Blau-werte	Rot-werte	Blau-werte	Rot-werte	Blau-werte
0 (670,8 μμ)	33		33,4		5,3		4,9	
1 (656 μμ)	48		56,4		9,1		8,4	
2 (642 μμ)	79		95,0		19		18	
3 (628 μμ)	107		126		38		38,5	
4 (615 μμ)	147		138		63		63	
5 (603 μμ)	151		155		90		84	
6 (591 μμ)	137		144		109		105	
7 (581 μμ)	124		129		111		113	
8 (571 μμ)	103		108		120		126	
9 (561 μμ)	82		89		108		106	
10 (552 μμ)	64		65		92		101	
11 (544 μμ)	52		56		78		85	
12 (536 μμ)	41	*6,3*	37,4	*6,0*	65		67,5	
13,5 (525 μμ)	26	*12*	21	*10,3*	38,3	*11,0*	46,8	
15 (515 μμ)	15	*28*	13,7	*21,6*	20,6	*34*	32,8	*13*
16,5 (505 μμ)	7,7	*36*	7,5	*32,2*	9,8	*35*	17,2	*29*
18 (496 μμ)	3,7	*48*	4,1	*46,3*	4,8	*47*	8,4	*33*
19,5 (488 μμ)	1,6	*62*	1,9	*58*	2,2	*57*	5,3	*49*
21 (480 μμ)	0,9	*64*	0,9	*67,0*	0,9	*66*	2,9	*71*
23 (469 μμ)	0,3	*70*	0,3	*65,6*	0,3	*67*	1,0	*69*
24,7 (460,8 μμ)	—	*67*	—	*68,6*	—	*54*	—	*66*

Um das, worauf es ankommt, sogleich möglichst anschaulich hervortreten zu lassen, gebe ich in Figur 1 die vier Kurven, welche für alle vier Beobachter die Rotwerte, in Figur 2 die vier Kurven, welche die Blauwerte als Funktion der Wellenlänge darstellen. Für die Beurteilung der Zahlen wie der

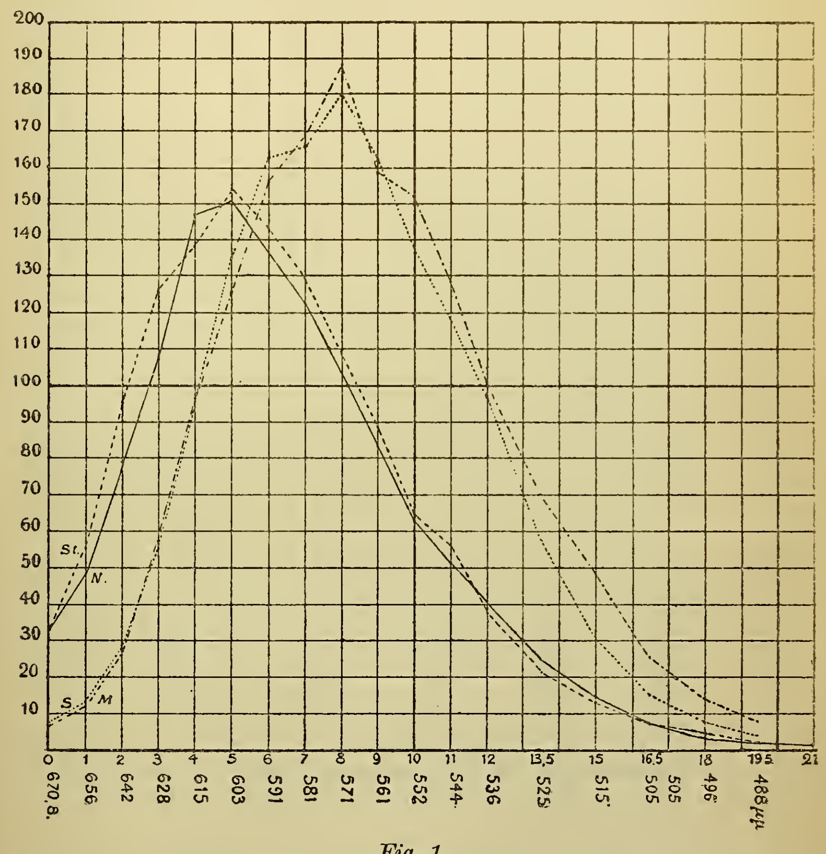


Fig. 1.

Verteilung der Rot-(*W*-) Werte im Dispersionsspektrum des Gaslichtes für 2 Protanopen (Rotblinde) S. .... und M. —.—.—. und für 2 Deuteranopen N. ——— und St. — — — —

Kurven wäre nur noch darauf hinzuweisen, dafs Rot- und Blauwerte zunächst in willkürlich gewählten Einheiten ausgedrückt sind. Auch die Mafsstäbe, in denen wir die Kurven zeichnen, sind demgemäfs willkürlich, und sie sind hier lediglich in dem Interesse gewählt, die Gestalt der verschiedenen Kurven (auf

die es allein ankommt) möglichst anschaulich hervortreten zu lassen. Richten wir unsere Aufmerksamkeit zunächst auf Fig. 1, so erkennen wir, dafs je zwei der Kurven mit grofser Annäherung zusammenfallen. Auf die geringen Unterschiede, welche zwischen den beiden nahe übereinstimmenden bleiben, (insbesondere zwischen M. und S.) soll später eingegangen werden. Vorderhand fassen wir die zwischen N. und St. einer-

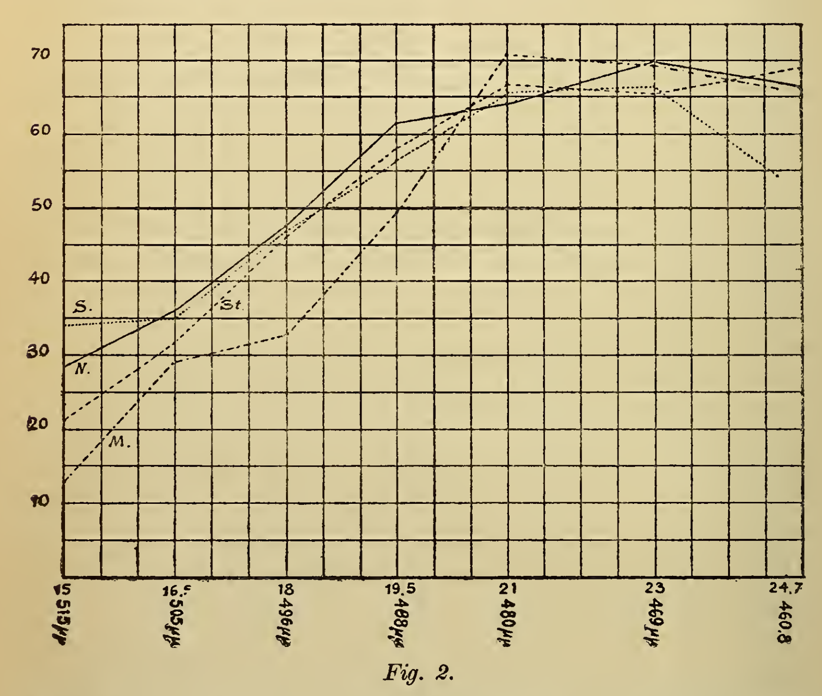


Fig. 2.

Verteilung der Blauwerte im Dispersionsspektrum des Gaslichtes für S. .... M. —.—.—. N. ——— und St. — — — —

seits, S. und M. andererseits bestehende Differenz genauer ins Auge.

Schon der erste Blick lehrt, dafs diese Differenz wohl kaum von der Art ist, dafs sie aus der bei den einen etwa stärkeren und bei den anderen schwächeren Makula-Pigmentierung erklärt werden könnte. Da nämlich, wie wir aus den Untersuchungen von Hering und Sachs wissen, die Beschaffenheit des Makula-Pigments trotz geringer individueller Verschiedenheiten doch durchgängig von der Art ist, dafs die Absorption im Grün-

gelb merklich zu werden anfängt, um mit abnehmender Wellenlänge stärker zu werden, so würden wir ein im Grüngelb beginnendes und gegen das brechbare Spektralende zunehmendes Auseinanderweichen der Kurven wohl verstehen können, wenn die eine einem stark, die andere einem schwach pigmentierten Auge angehörte. Statt dessen sehen wir den grundverschiedenen Verlauf der Kurven schon im langwelligsten Teil des Spektrums vollkommen deutlich, ja sogar hier vorzugsweise deutlich ausgeprägt. Die einen haben ihr Maximum etwa bei 603, die anderen bei 571 $\mu\mu$; in dem Spatium von 603 bis 571 $\mu\mu$ steigen die einen stark an, während die anderen absinken. Es ist vielleicht nicht überflüssig, auf die unmittelbare Bedeutung dieser in den Kurven ausgedrückten Thatsache hinzuweisen; sie ist die genauere und vollständigere Darstellung der allbekannten Differenz, welche als Verkürzung des roten Spektralendes für die eine Gruppe der Dichromaten beschrieben zu werden pflegt. In der That zeigt ja die sehr niedrige Lage der Rot-Kurve am langwelligen Ende des Spektrums schon bei Wellenlängen über 620 $\mu\mu$ den dort sehr geringen und mit zunehmender Wellenlänge sich noch rapide vermindernden Reizwert dieser Lichter an. Auch der Dichromat dieses Typus kann eine Gleichung zwischen rotem Licht (z. B. von 670,8 $\mu\mu$) und gelbem (etwa *Na* Licht), ganz wohl herstellen. Aber er mufs zu zu dem Ende dem Rot eine Intensität geben, bei der es für die anderen Dichromaten (wie auch für den Farbentüchtigen) ungemein viel heller als das Gelb erscheint.

Dafs der Unterschied der beiden Gruppen nicht auf eine Differenz des Makula-Pigments zurückgeführt werden kann, darf wol schon hiernach als ziemlich sicher gelten. An die sonstigen im Auge bekannten leicht gelblichen Pigmentierungen in Linse und Glaskörper wird man ebensowenig denken dürfen, da auch diese nur am brechbaren Ende stärkere Absorptionen ergeben. Es ist aber nicht ohne Interesse, zu fragen, ob der Unterschied überhaupt von der Art ist, dafs er auf irgend welche Verhältnisse der Lichtabsorption in den Augenmedien zurückgeführt werden kann, und wie diese event. beschaffen sein müssen. Für diese Frage gewinnen wir eine feste Unterlage durch die folgende einfache Überlegung.

Es sei die für den einen Dichromaten geltende Mischungsgleichung

$$x L_\lambda = a R + b Bl,$$

in Worten: die Menge x des Lichtes von der Wellenlänge λ erscheine gleich dem Gemisch von der Menge a roten Lichtes und der Menge b blauen Lichtes. Im Auge eines anderen Individuums mögen nun die Intensitätsverhältnisse der verschiedenen Lichter durch absorbierende Medien derart verändert sein, dafs das Licht λ relativ zum Rot auf den Bruchteil α_λ, Blau auf den Bruchteil α_b reduciert ist. Dann wird die Gleichung für diese Person lauten:

$$x L_\lambda = a' R + b' B, \text{ worin}$$

$$a' = \alpha_\lambda \, a \text{ und}$$

$$b' = \frac{\alpha_\lambda}{\alpha_b} \cdot b \text{ ist.}$$

Sind also a' und a die Ordinaten der Rot-Kurve, b' und b die der Blau-Kurve für zwei Personen, so erhalten wir durch den Quotienten $\frac{a'}{a}$ die relative Schwächung des Lichtes λ im Vergleich zu dem des roten Lichtes, durch den Wert $\frac{b}{b'} \cdot \frac{a'}{a}$ die relative Schwächung des Blau. Hieraus ist zunächst zu entnehmen, dafs die Modifikation jeder derartigen Mischungsgleichung die relative Schwächung sowohl des homogenen Lichtes λ wie des in der Mischung verwendeten Blau zu berechnen gestattet.

Da nun solche Mischungsgleichungen für eine beträchtliche Zahl homogener Lichter vorliegen, so hat man in einer Bestimmung der aus jeder einzelnen sich ergebenden Schwächung des Blau zunächst die Möglichkeit einer Prüfung, ob die betreffenden Modifikationen überhaupt auf Absorption beruhen. In allen Mischungsgleichungen müfsten die Quotienten $\frac{Rot}{Blau}$ der einen Person gegenüber denjenigen der anderen in demselben Verhältnis geändert sein. Leider ist die praktische Durchführung dieser Prüfung nicht wohl möglich. Da nämlich die Blauwerte bis zur Wellenlänge 535 noch nahezu gleich Null sind und erst von 515 an ihre Bestimmung auf eine er-

hebliche Genauigkeit Anspruch machen kann, und da andererseits von 486 ab die Rotwerte bereits so gering sind, dafs ihre quantitative Verwertung auf Bedenken stösst, so ist das eine Vergleichung gestattende Gebiet sehr klein. Überdies, wie wir später noch sehen werden, sinken hier die beiden *W*-Kurven (des Rot- und des Grünblinden) nahezu proportional ab. Demnach sinken auch die Quotienten $\frac{Rot}{Blau}$ innerhalb dieses Gebietes in allen vier Fällen zwar mit mancherlei Verschiedenheiten, aber doch ohne eine sichere Unterscheidung der beiden Typen zu gestatten. Sehen wir also hiervon ab und betrachten zunächst die allgemeine Möglichkeit als gegeben, dafs die Modifikation der Mischungsgleichungen auf physikalischer Ursache beruhe, so wird es um so wichtiger sein, zu prüfen, welcher Art das hypothetische absorbierende Medium sein müfste.

Der Gang der demselben zuzuschreibenden Lichtschwächungen würde für die weniger brechbare Hälfte aus dem Verlauf je zweier Rot-Kurven, für die brechbarere aus dem Verlauf je zweier Blau-Kurven mit grofser Sicherheit entnommen werden können. Natürlich bleibt es zunächst willkürlich, ob wir das hypothetische Pigment in das Auge des Grünblinden oder des Rotblinden verlegen wollen. Thun wir das erstere und berechnen danach die relative Schwächung der verschiedenen Lichter im Vergleich zu *Li*-Rot, die wir im Auge von Herrn NAGEL gegenüber demjenigen von Herrn SEHRWALD annehmen müfsten, so erhalten wir die folgende Zusammenstellung, in welcher die Zahlen angeben, auf welchen Bruchteil seines Wertes wir uns das betreffende Licht durch Absorption reduciert denken müfsten:

Wellenlänge	656	642	628	615	603	591	581	571	561	552	544	536
Berechnete Schwächung	0,85	0,68	0,45	0,37	0,26	0.2	0,18	0,14	0,12	0,11	0,11	0,10

Andererseits lehrt ein Blick auf die Blau-Kurven, dafs diese in der ganzen brechbaren Spektralhälfte für NAGEL und SEHRWALD nahe übereinstimmend verlaufen, wonach also die bei N. angenommene Schwächung des Lichtes hier annähernd konstant bleiben müfste.[1] Wir werden also dazu geführt, im Auge des Deuteranopen ein Pigment anzunehmen, dessen Absorp-

[1] Genau betrachtet lehren sogar die Blau-Kurven, dafs mit weiter abnehmender Wellenlänge die Absorption bei NAGEL gegenüber SEHRWALD eher wieder etwas geringer wird.

tion, bereits im Rot beginnend, *Na* Licht bereits auf ¹/₅, *Tl* Licht auf ¹/₁₀ seines Betrages schwächen würde, um von da ab gegen das blaue Ende nicht mehr merklich zuzunehmen.

Verlegte man andererseits das hypothetische Pigment in die Augen der Herrn M. und S., so müſste seine Absorption mit zunehmender Wellenlänge etwa im Grüngelb beginnen und rapide zunehmen, so daſs *Li* Rot im Vergleich z. B. zu Licht 535 auf ¹/₁₀ seines Wertes geschwächt würde. In beiden Fällen müſste es sich um ein Pigment handeln, welches von den bekannten gelben und gelblichen Pigmenten des Auges, insbesondere dem des gelben Flecks, toto coelo verschieden wäre. Pigmente dieser Art (ein rotes in dem einen, ein blaugrünes in dem anderen Falle) hätten nun bei der Häufigkeit beider Formen der Farbenblindheit wohl kaum der Beobachtung entgehen können. Da aber bisher nie etwas derartiges entdeckt worden ist, so wird man wohl sagen dürfen, daſs, nachdem die Erklärung der in Rede stehenden Differenz aus den Unterschieden des Makula-Pigments definitiv gescheitert ist, eine Erklärung aus irgend welchen anderen Verhältnissen der Lichtabsorption in gefärbten Medien kaum ernstlich in Frage kommt.

Hierzu kommt nun noch ein zweites, für die theoretische Deutung sehr beachtenswertes Moment. Die mehrerwähnte, durch die Kurven der Figur 1 zur Anschauung gebrachte Differenz zwischen Protanopen und Deuteranopen ist nicht von der Art, daſs sich in ihr die individuellen Schwankungen einer hier stärkeren und dort geringeren Pigmentierung verrieten; sie ist keine fluktuierende, sondern eine typische. Man wird zur Erhärtung dieser Anschauung das hier vorgelegte Material von vier Fällen mit Recht zu klein finden. Indessen ist die Gesamtheit des z. Zeit bekannten Beobachtungsmaterials doch ausreichend, um dies ganz auſser Zweifel zu stellen. Zunächst enthalten die Beobachtungen von König und seinen Mitarbeitern die Farbensysteme von vier Dichromaten, deren Rot-Kurven genau in derselben Weise wie die unserigen in zwei Typen auseinanderfallen. Die Gründe, weshalb zwischen den Königschen Kurven und den unserigen eine ganz vollkommene Übereinstimmung nicht zu erwarten ist, sind bekannt; sie liegen, abgesehen von Unterschieden in Bezug auf das benutzte Licht, die Reinheit der Spektren u. a., vornehmlich darin, daſs bei König mit gröſseren Feldern und nicht mit hell-adaptiertem

Auge gearbeitet wurde. Immerhin ist die Übereinstimmung doch eine frappante, wie namentlich an der Lage der beiden Kurvengipfel wahrzunehmen ist, von denen bei uns wie bei König der eine etwa bei 603, der andere etwa bei 570 $\mu\mu$ gefunden wird. Da ja auch die Zahl von 8 noch eine geringe ist und der Wert der Übereinstimmung auch noch durch die erwähnten Ungleichheiten der Methode etwas gemindert wird, so habe ich nach einer weiteren Vermehrung des Materials gestrebt. Nun ist die Zahl derjenigen farbenblinden Personen, von denen man die für eine Darstellung der obigen Art erforderlichen sorgfältigen und ausgedehnten Beobachtungen erhalten kann, immer eine sehr beschränkte; es erschien mir daher zweckmäfsig, da die Ausdehnung dieser Untersuchungen auf sehr viele Personen ganz unausführbar ist, von einer möglichst grofsen Zahl von Dichromaten nur eine als Specimen geeignete Bestimmung ausführen zu lassen. Als solche habe ich die Verwechselungsgleichungen zwischen *Li* Rot und *Na* Gelb gewählt und dabei die folgenden, schon an anderer Stelle[1] mitgeteilten Resultate erhalten. Zehn Teile *Na* Gelb erschienen den im ersten Stabe der Tabelle 2 aufgeführten Beobachtern gleich mit den im zweiten Stabe eingetragenen Mengen *Li* Rot. Es sei hier des weiteren über diese Versuche nur bemerkt, dafs jede Zahl den Mittelwert aus einer mäfsigen Zahl (fast immer 10) Einstellungen angiebt. No. 1 und 7, 10 und 12 sind dieselben Personen, denen die oben behandelten ausführlichen Bestimmungen angehören.

Tabelle II.

No.	Beobachter	*Li* Rot	No.	Beobachter	*Li* Rot
1.	W. Nagel	36.5	9.	F.	40.0
	„	36.3	10.	S.	214
	„	36.3	11.	V.	213
	„	36.5	12.	M. M.	211
	„	38.4	13.	E. J.	205
2.	L. V.	37.3	14.	H.	196
3.	A. V.	37.0	15.	E. I.	198
4.	Schn.	37.0	16.	E. II.	210
5.	O. N.	37.8	17.	K.	200
6.	K. St.	37.0	18.	W.	210
7.	H. St.	36.9	19.	B.	203
8.	O. St.	38.0	20.	Th.	225

[1] *Centralblatt für Physiologie.* 1896. S. 148.

Der vollkommen scharfe und typische Charakter des zwischen den beiden Dichromatengruppen stattfindenden Unterschiedes darf hiernach wohl, im Hinblick auf die hier behandelten 20 Fälle schon als ziemlich sicher gestellt gelten.

Wir können aber hier noch auf ein älteres Beobachtungsmaterial hinweisen, welches zwar etwas weniger scharf, aber doch deutlich genug die gleiche Thatsache zur Anschauung bringt. Es sind nämlich schon im Jahre 1884 von Donders Verwechselungsgleichungen zwischen *Li* Rot und *Na* Gelb an Dichromaten gewonnen und mitgeteilt worden.[1]

Tabelle III (nach Donders).

10 Teile Natrium-Licht erscheinen gleich Lithium-Licht:

Rotblinde:		Grünblinde:	
I	360	I	65,2
II	232	II	68,2
III	327	III	66,9
IV	283	IV	62,5
V	277	V	66,7
VI	295	VI	65
VII	240	VII	68,5
VIII	296	VIII	59,5
IX	217	IX	31,4
X	240	X	84,2
Mittel	276.	Mittel	63,84.

Ich reproduziere hier die Tabelle von Donders, wobei wiederum im ersten Stabe die Bezeichnung des betreffenden farbenblinden Beobachters, im zweiten Stabe die Menge des *Li*-Rots angegeben ist, welche 10 Teilen *Na*-Licht gleich erschienen. Dafs die Zahlen hier absolut merklich andere sind, als die unsrigen, darf nicht befremden; denn die Werte, die man erhält, hängen in beträchtlichem Mafse von der Reinheit der Spektren und der Art der benutzten Lichtquelle ab. Ebensowenig ist es überraschend, dafs die Dondersschen Zahlen innerhalb jeder Gruppe stärkere Schwankungen aufweisen, als die unsrigen; wir wissen, dafs annähernd konstante Zahlen nur bei kleinem Beobachtungsfelde und helladaptiertem Auge zu erhalten sind, Bedingungen, deren Bedeutung damals noch nicht

[1] Donders, Farbengleichungen. *Arch. f. Physiol.* 1884. S. 528.

bekannt war, und die daher auch nicht eingehalten wurden. Trotzdem zeigen doch auch die DONDERSschen Zahlen durchaus überzeugend, daſs dasselbe gelbe Licht von der einen Gruppe einer etwa 4—5fach gröſseren Intensität des *Li*-Rots gleich gehalten wird, als von der anderen.

Man kann daher wohl sagen, daſs der typische Unterschied der beiden Dichromaten-Gruppen z. Z. an nicht weniger als 40 Fällen in übereinstimmender Weise festgestellt worden ist, und man wird verständiger Weise kaum zweifeln dürfen, daſs auch für diese Fälle bei vollständigerer Untersuchung sich die gleiche Art des Sehens herausgestellt haben würde, wie sie bei den Repräsentanten der einen und anderen Gruppe gefunden worden ist, die einer genaueren Untersuchung unterzogen werden konnten.

Sollten im Hinblick auf manche älteren Untersuchungen noch Zweifel über den scharfen und typischen Unterschied der beiden Gruppen bestehen, so wird noch darauf hinzuweisen sein, daſs uns gegenwärtig die Gründe bekannt sind, aus denen bei gewissen Untersuchungsweisen der Unterschied der beiden Gruppen sich mehr oder weniger verwischt. So ist z. B., wenn man ein homogenes Blaugrün mit einer Mischung aus Rot und Blau vergleichen läſst (wie es vor Jahren KÜSTER und ich gethan) die Stäbchenvalenz der beiden Felder auſserordentlich ungleich; läſst man also, wie auch wir damals thaten, mit mäſsig adaptiertem Auge beobachten, so ist es begreiflich, daſs die Ergebnisse sehr schwankend werden und der Unterschied nicht so scharf hervortritt, wie man es auch hier erwarten könnte, sofern reine Hellgleichungen hergestellt würden. Auſserdem gewinnen, wovon später noch eingehender zu reden sein wird, in der That die Differenzen der Makula-Pigmentierung auf gewisse Gleichungen einen nicht unerheblichen Einfluſs; wir werden sehen, daſs hierdurch z. B. der zu erwartende Unterschied in der Lage des Neutralpunktes zwar nicht aufgehoben, wohl aber verwischt und unscharf gemacht wird. Auch diese Thatsachen sind also ganz verständlich und beeinträchtigen nicht die Anschauung von einem völlig präzise fixierten Unterschied der beiden Gruppen der Dichromaten, der klar zur Erscheinung kommt, wenn man Hellgleichungen herstellen läſst, und wenn man, durch Beschränkung auf die weniger brechbaren Teile des Spektrums, sich von den individuell schwankenden

Verhältnissen der Makula-Pigmentierung unabhängig hält. Mir scheint, dafs auch schon dieser typische Charakter der erwähnten Differenz sehr gegen die Zurückführung derselben auf ein absorbierendes Pigment spricht. Wollte man wirklich daran denken (was ja vielleicht noch am ehesten ansprechend erscheinen könnte), die Unterempfindlichkeit der Rotblinden gegen die langwelligen Lichter auf ein Rot-absorbierendes Pigment zurückzuführen, so würde sich doch durchaus nicht verstehen lassen, weshalb jene Unterempfindlichkeit immer eine ganz bestimmte, durch den gleichen Zahlenwert gemessene sein sollte, da doch ein derartiges Pigment gewifs ebenso wie das Makula-Pigment in sehr wechselnder Stärke zu erwarten und somit auf das Auftreten aller Übergänge von den geringsten bis zu den stärksten Werten zu rechnen sein sollte.

Die Vergleichung der beiden Gruppen der Dichromaten führt somit zu dem Ergebnis, dafs zwischen ihnen ein scharfer und typischer Unterschied besteht, welcher auf eine Differenz der uns bekannten gelblichen Pigmente der Augenmedien jedenfalls nicht zurückgeführt werden kann, und der, wie sich mit gröfster Wahrscheinlichkeit sagen läfst, überhaupt eine Erklärung aus irgend welchen hypothetisch anzunehmenden Pigmentierungen nicht gestattet. Im Anschlufs an diese Konstatierung wird nur die Bemerkung noch am Platze sein, dafs selbstverständlich auch die dieser Aufstellung hauptsächlich zu Grunde liegende Zahl von 40—50 Fällen zu klein ist, um etwa die Behauptung zu gestatten, dafs Fälle anderer Art niemals vorkämen. Ich habe bis jetzt keinen Fall zur Beobachtung bekommen, der sich als typischer Dichromat qualifiziert hätte, und der sich nicht bei der Prüfung an der *Li-Na*-Gleichung sofort als der einen oder der anderen Gruppe streng angehörig erwiesen hätte; die obige Zusammenstellung umfafst in der That alle mir zur Beobachtung gekommenen und in dieser Richtung geprüften Fälle von vollständiger partieller Farbenblindheit. Selbstverständlich aber kann und will ich nicht behaupten, dafs nicht daneben (wenn auch gewifs wohl nur recht selten) andere Formen vorkommen. Auch hierdurch würde natürlich die für die überwiegende Mehrzahl geltende Thatsache einer scharfen Sonderung in zwei Gruppen nicht in Frage gestellt werden.

Da bekanntlich, wie schon erwähnt, Hering den Versuch

gemacht hat, den Unterschied der beiden Dichromatengruppen auf die Differenzen des Makula-Pigmentes zurückzuführen, so erschien es, auch nachdem die Unmöglichkeit dieser Auffassung nachgewiesen war, von Interesse, zu sehen, welche Rolle denn diese ja zweifellos vorhandenen Differenzen in dem Sehen der Dichromaten spielen. Ich habe daher an den mir zur Verfügung stehenden Beobachtern (Farbenblinden) hierüber in verschiedener Richtung Versuche gemacht, die um so mehr Interesse boten, als man hier weit eher als beim Trichromaten hoffen durfte, zahlenmäſsige Aufschlüsse über den Wert der betreffenden Absorptionen zu erhalten.

Ich erwähne hier zunächst eine Anzahl von Bestimmungen, welche geeignet sind, auch von dieser Seite her den Satz zu illustrieren, daſs diese Absorptionsverhältnisse mit dem Typenunterschiede der beiden Dichromatengruppen nichts zu thun haben. Bekanntlich kann man die Differenzen der Pigmentierung am einfachsten so zur Darstellung bringen, daſs man eine Gleichung zwischen einem homogenen Licht, z. B. (beim Trichromaten) Gelb und der Mischung aus einem länger- und einem kürzerwelligen Licht (Rot und Grün) herstellen läſst. Das homogene Licht kann durch das absorbierende Medium nur in seiner Intensität verändert werden; wenn daher die eigentlichen optischen Substanzen durchweg dieselben sind, so wird, um Gleichheit mit dem Gelb zu erhalten, im Gemisch relativ um so mehr Grün erforderlich sein, je stärker dieses durch das vorhandene Pigment absorbiert wird. Die Anwendung dieses Verfahrens auf den Dichromaten erfordert insofern besondere Überlegung, als zunächst die Rot-Grünmischungen nicht angewandt werden können, da die Dichromaten hier bei jedem beliebigen Verhältnis von spektralem Rot und gelblichem Grün Gleichungen mit Gelb gewinnen können. Will man ferner die Vergleiche nicht bloſs innerhalb jeder Gruppe ausführen, sondern ein Urteil gerade darüber gewinnen, wie sich die Pigmentierungen der sämtlichen Fälle gegeneinander verhalten, so sind naturgemäſs von den dem obigen Prinzipe folgenden Vergleichungen auch diejenigen ausgeschlossen, bei welchen die Typusdifferenz sich einmischen kann. Es wäre also z. B. unzulässig, eine Vorstellung über die Pigmentierung daraus herzuleiten, wieviel Blau einem Rot zuzumischen ist, um eine Gleichung zwischen diesem Gemisch und einem homogenen

Blaugrün zu erhalten, da in dieser Hinsicht Typusdifferenzen möglicherweise bestehen können und, wie die Erfahrung lehrt, thatsächlich bestehen. Will man hiervon unabhängig sein, so kann nur eine Gleichung benutzt werden, welche (von Pigmentierungsdifferenzen abgesehen) für Rot- und Grünblinde übereinstimmend gilt, und dies ist (wie später noch zu zeigen ist) eine, die auch für den Trichromaten Gültigkeit besitzt. Den hierdurch fixierten Anforderungen genügt annähernd eine Gleichung zwischen einem homogenen Blaugrün etwa von der Wellenlänge 490 $\mu\mu$ und einer Mischung aus Grün und Blau, wobei das Blau etwa von 460 $\mu\mu$, das Grün zwischen 517 und 510 gewählt werden kann. Da die Absorption des Makula-Pigments für das blaue Licht erheblich stärker ist, als für das grüne, so beobachtet man leicht, dafs die auf kleinem Felde und für direkte Fixation hergestellte Gleichung auf gröfserem Felde und bei exzentrischer Betrachtung unzutreffend wird: das Gemisch erscheint merklich zu blau. Ebenso fallen denn auch, wenn man von vielen Personen derartige Einstellungen machen läfst (und zwar immer bei direkt fixiertem kleinem Felde), die Einstellungen ziemlich verschieden aus, und wir werden im allgemeinen diejenigen, die im Gemisch mehr Blau nötig haben, für die mit stärker pigmentierter Makula Behafteten halten dürfen. Eben diese Bestimmungen habe ich nun von den meisten der oben erwähnten Dichromaten ausführen lassen. Da infolge zufälliger Umstände hierbei nicht allemal das gleiche Grün gewählt worden war, so sind diese Zahlen am besten so untereinander vergleichbar, dafs ich den im Gemisch erforderten Quotienten $\frac{\text{Blau}}{\text{Grün}}$ im Verhältnis zu demjenigen angebe, welchen in unmittelbar gleichzeitig angestellten Versuchen Herr Dr. W. Nagel einstellte. Diese Zahlen betrugen:

I. für Dichromaten der protanopischen (rotblinden) Gruppe 0,6; 0,84; 1,01; 1,06; 1,14; 1,5;

II. für Dichromaten der deuteranopischen (grünblinden) 0,71; 0,74; 0,81; 0,87; 0,97; 1,2.

Die Zahlen besagen, was eben auch der bei den Beobachtungen ausgeführte direkte Vergleich unmittelbar lehrte, dafs in beiden Gruppen sowohl solche Personen vorkommen, die mehr, als auch solche, die weniger Blau einstellen, als Nagel. Es läfst sich also nach diesem Kriterium eine Pigmen-

tierungsdifferenz zwischen den beiden Gruppen nicht konstatieren; jede umfaſst stärker und schwächer pigmentierte Individuen; die schwächste (0,6; Stud. M.) und die stärkste (1,5; Stabsarzt S.) gehören derselben Gruppe an.

Interessanter als diese, im Hinblick auf früher Erörtertes kaum mehr erforderliche Feststellung ist es, diejenigen Differenzen genauer zu verfolgen, welche wirklich auf der Makula-Pigmentierung beruhen. Die einfachere Natur des Farbensystems bringt es mit sich, daſs dies an zwei Dichromaten des gleichen Typus leichter und vollständiger geschehen kann, als an zwei Trichromaten. Ein besonders günstiger Zufall war es dabei, daſs die beiden systematisch und vollständig untersuchten Protanopen (Stabsarzt S. und Stud. M.), wie schon aus den oben angeführten Zahlen entnommen werden konnte, zwei ziemlich extreme Fälle stärkster und schwächster Makula-Pigmentierung darstellten. Die Bedeutung dieses Umstandes kann nun in der That sehr klar und instruktiv an den Mischungsergebnissen verfolgt werden. Um dies zur Anschauung zu bringen, betrachte man in Fig. 1 die beiden die Rotwerte darstellenden Kurven, in Fig. 2 die den Blauwert darstellenden der Herren S. und M. Man erkennt mit groſser Deutlichkeit, daſs beide M-Kurven sich von den S-Kurven in einem bestimmten Sinne unterscheiden. Bei den Rotkurven zeigt sich etwa von 552 μ an ein Unterschied in dem Sinne, daſs die Kurve des stark pigmentierten Herrn S. kleinere Ordinaten aufweist, als diejenige des schwach pigmentierten Herrn M., woraus die allmählich bei einer unter 552 $\mu\mu$ sinkenden Wellenlänge mehr und mehr zur Geltung kommende Absorption ersichtlich wird. Die Blaukurven zeigen das Gleiche, nur mit der Modifikation, die dadurch bedingt ist, daſs auch das im Gemisch figurierende Blau der starken Absorption bei Herrn S. unterliegt. Aus diesem Grunde müssen die Kurven bei 460, obwohl hier die Absorption am stärksten ist, für beide Beobachter zusammenfallen; um aber Gleichheit mit einem Licht, z. B. von 490, zu erzielen, braucht M. weniger Blau als S., hier muſs also die M-Kurve unter der S-Kurve liegen und dieser Unterschied mit zunehmender Wellenlänge immer stärker hervortreten. In beiden Fällen muſs mit abnehmender Wellenlänge die S-Kurve weniger ansteigen oder steiler absinken, als die M-Kurve, das Verhältnis der S-Werte zu den M-Werten

immer kleiner werden. Dies bestätigen denn auch die Zahlen, wie die nachstehende Zusammenstellung zeigt, in welcher das Verhältnis der *W*-Ordinate des Herrn S. zu der des Herrn M. als Funktion der Wellenlänge dargestellt ist:

Wellenlänge	670,8	656	692	628	615	603	591	581	571 $\mu\mu$
Ordinaten-Verhältnis	1,1	1,1	1,05	1,00	1,00	1,07	1,07	0,98	0,96

561	552	544	536	525	515	505	496	488	480	469 $\mu\mu$
1,02	0,91	0,91	0,97	0,91	0,63	0,63	0,57	0,42	0,41	0,3

Wenn wir daher hier aus den Mischungsbeobachtungen einen Schlufs auf die Natur des der Differenz zu Grunde liegenden absorbierenden Pigmentes machen, so werden wir demselben eine solche Beschaffenheit zuzuschreiben haben, dafs die Absorption im Grünlichgelb anfängt merklich zu werden, und mit abnehmender Wellenlänge jedenfalls bis 469 $\mu\mu$ stetig zunimmt, besonders stark etwa in dem Spatium von 520—490 $\mu\mu$. Es braucht kaum noch darauf hingewiesen zu werden, in wie guter Übereinstimmung sich dies mit den Sachsschen Untersuchungen des Makula-Pigments befindet, übrigens auch mit dem, was uns jederzeit die Vergleichung zentraler und exzentrischer Mischungsgleichungen lehren kann. Hier also, in den Differenzen zweier dem gleichen Typus angehörenden Dichromaten, kommt in Wirklichkeit der Einflufs des absorbierenden Pigmentes mit voller Deutlichkeit zur Erscheinung.

Es erschien bei dieser Sachlage besonders interessant, für die auf solchen Individualitäten beruhenden Unterschiede eine zahlenmäfsige Fixierung zu finden. Eine solche zu geben, sind bereits die obigen Quotienten geeignet. Nehmen wir an, dafs das Pigment das langwellige Licht nicht beeinflufst, so würden wir, ihnen zufolge, annehmen dürfen, dafs das blaue Licht bei Herrn S. etwa auf 0,3 desjenigen Wertes geschwächt ist, mit dem es bei Herrn M. zur Wirkung kommt.

Sicherer als diese rechnende Verwertung eines ausgedehnten und schliefslich doch niemals in allen seinen Teilen unter ganz genau identischen Bedingungen stehenden Beobachtungsmaterials erschien die direkte Ermittelung durch gleichzeitig ausgeführte Parallelbeobachtungen, wie sie durch die Gefälligkeit der beiden Herren in dankenswerter Weise ermöglicht wurden. Es wurde zu diesem Zwecke so zu Werke gegangen,

dafs beide Beobachter in unmittelbarem Anschlufs aneinander Gleichungen zwischen einem homogenen Blaugrün von 491 $\mu\mu$, ihnen annähernd farblos, und einem Gemisch aus Gelb (589) und Blau (460,8) herzustellen hatten. Hier konnte die relative Schwächung des Blau direkt, ohne Zwischenrechnung, ausgewertet werden, und es zeigte sich denn auch mit grofser Deutlichkeit der beträchtliche Unterschied in dem erwarteten Sinne. Das von Herrn M. als dem homogenen Lichte gleich eingestellte Gemisch erschien Herrn S. stark gelb, das von Herrn S. eingestellte war für Herrn M. gegenüber dem homogenen deutlich zu blau. Da Herr M. den Nicol im Durchschnitt auf 71,25, Herr S. auf 78,15^0 einstellte, so berechnet sich für die Absorption des blauen Lichtes im Auge des Herrn S. hiernach eine Schwächung auf den Wert $\frac{tg^2 71,25}{tg^2 78,15} = 0,38$. Natürlich kann nicht in Abrede gestellt werden, dafs noch stärkere Pigmentierungen als diejenige des Herrn S. und noch schwächere als die des Herrn M. vorkommen, und somit auch der Unterschied zwischen zwei Beobachtern einmal noch beträchtlicher als hier ausfallen kann. Immerhin dürfte, da es sich um den stärkst- und den schwächst-pigmentierten aus einer gröfseren Zahl von Personen handelte, die hier erhaltene Differenz schon eine verhältnismäfsig hohe sein. Wir werden auf diese Werte später bei den Farbentüchtigen, wo ihre Ermittelung schwieriger ist, wieder zurückzukommen haben.

Wie vorhin schon erwähnt, macht sich die Stärke der Makula-Pigmentierung sehr deutlich auch in der Lage des neutralen Punktes im Spektrum geltend, wenn man hierunter (wie üblich) dasjenige homogene Licht versteht, welches einem gewissen unzerlegten Weifs für gleich gehalten wird. In der That unterliegt ja auch hier wieder das gemischte Weifs, nicht aber das homogene Licht, einer qualitativen Veränderung durch das absorbierende Medium; in dem stark pigmentierten Auge ist der ganze brechbare Teil des Spektrums merklich geschwächt, und es wird daher das gleich erscheinende homogene Licht zu einem erheblich gelblicheren Gemisch gesucht, als dies bei dem schwächer pigmentierten Auge der Fall ist. Es erschien wichtig, eine bestimmte Vorstellung darüber zu gewinnen, in welcher Breite etwa zufolge dieses Umstandes die Lage des Neutralpunktes im Spektrum schwanken könne. Auch

dies wurde durch gleichzeitig resp. alternierend ausgeführte Parallelbeobachtungen der Herren M. und S. ermittelt. Diese lehrten sofort, daſs Herr M. ein merklich kürzerwelliges Licht dem unzerlegten Weiſs gleich hielt als S.; beiden erschien das durch Spiegelung in den Apparat gebrachte unzerlegte weiſse Licht als farblos; das von Herrn M. als gleich eingestellte homogene war für S. blau, das von S. eingestellte für M. gelb. Die Einstellungen unterschieden sich um etwa 8 $\mu\mu$.

Sehr interessant waren nun die, ebenfalls gleichzeitig gemachten Einstellungen des Herrn Dr. Nagel, dessen Makula-Pigmentierung, wie oben erwähnt, als eine mittlere, stärker als bei M., schwächer als bei S., betrachtet werden darf. Das von ihm eingestellte homogene Licht lag nämlich stets noch etwas rotwärts von demjenigen des Herrn S. Die folgende kleine Tabelle mag die Ergebnisse übersichtlicher machen.

Tabelle IV.

Art des gemischten Lichts	Wellenlänge des als gleich eingestellten homogenen Lichts		
	Nagel	Sehrwald	Marx
Magnesium Oxyd-Fläche in Tageslicht	499	498	490
Gespiegeltes Wolkenlicht durch Mattglas abgeschwächt	499	497	489
Gespiegeltes Wolkenlicht durch Rauchglas abgeschwächt	495	494	486

Wir sind hiernach, wie ich glaube, in der Lage, die Verhältnisse bezüglich des Neutralpunkts vollkommen zu verstehen, und insbesondere auch gewisse früher bestandene theoretische Schwierigkeiten aus dem Wege zu räumen. Der Theorie nach (mögen wir von den ursprünglichen Helmholtzschen Darstellungen ausgehen oder auch an die von König und von uns gewonnenen Kurven uns halten) ist immer zu erwarten, daſs der Neutralpunkt[1] für den Grünblinden an einer weniger brech-

[1] Ich verstehe hierunter immer dasjenige homogene Licht, welches einem unzerlegten Weiſs gleich erscheint.

baren Stelle des Spektrums gefunden werde, als für den Rotblinden. Warum hat sich dies trotz der zahlreichen über die Lage des neutralen Punktes angestellten Untersuchungen nicht mit Sicherheit herausgestellt? Der Grund liegt zunächst darin, dafs bei der faktischen Gestaltung der beiden Kurven der Unterschied in der Lage des neutralen Punktes kein so sehr grofser ist. Die Erregbarkeitskurven der Rot- und der Grün-Komponente fallen zwar vollkommen scharf und deutlich auseinander, aber doch nicht so stark, wie dies von Helmholtz in den zunächst fingierten Kurven (z. B. erste Auflage der *Physiol. Optik*, S. 291) angenommen worden ist. Aus diesem Grunde ist also (ceteris paribus) der Neutralpunkt für den Grünblinden zwar deutlich, aber doch nicht sehr viel rotwärts von dem des Rotblinden gelegen. Wir können die Differenz etwa auf 4—6 $\mu\mu$ veranschlagen. Diese Differenz kommt aber nur dann rein zur Geltung, wenn wir zwei Personen mit etwa gleicher Makula-Pigmentierung vergleichen. Beobachten wir aber eine gröfsere Zahl von Personen ohne Rücksicht hierauf, so sind die in dieser Beziehung bestehenden individuellen Differenzen beträchtlich genug, um die Grenze zu verwischen; der Neutralpunkt des schwach pigmentierten Grünblinden kann sich dem des stark pigmentierten Rotblinden annähern, ja gelegentlich wohl auch über ihn hinausgehen und (im scheinbaren Gegensatze zur Theorie) sich blauwärts von diesem finden. Dies ist nach Allem, was wir gegenwärtig wissen, durchaus zu verstehen. Zu erwägen ist dann ferner, dafs die Aufsuchung des Neutralpunktes auch aus anderen Gründen noch auf manche Schwierigkeiten stöfst, welche Schwankungen in die Ergebnisse bringen können. Hierzu gehört zunächst, dafs das zum Vergleich dienende unzerlegte Weifs nicht mit Sicherheit durchweg von der absolut gleichen Beschaffenheit zu erhalten ist, sodann aber auch das sogenannte „Wandern“, welches bei abnehmender Lichtstärke und Dunkeladaptation sich bemerkbar macht und, wie früher auseinander gesetzt wurde,[1] auf der Einmischung der Stäbchenfunktion beruht. Es wird daher nicht überraschen können, dafs die älteren Beobachtungen lediglich die Existenz eines gewissen Spatiums für die Lage des neutralen Punktes ergeben haben, ohne einen

[1] *Zeitschr. f. Psychol.* IX. S. 99f.

sicheren Unterschied des einen und des anderen Typus erkennen zu lassen. Selbst gegenwärtig würde ich mich nicht anheischig machen mögen, allein aus der Bestimmung des Neutralpunktes den Rotblinden vom Grünblinden zu unterscheiden.

Es erübrigt, die individuellen, von der Makula-Pigmentierung abhängenden Differenzen noch in einigen weiteren Beziehungen zu verfolgen. Was zunächst die beiden der anderen Gruppe angehörigen Dichromaten, Nagel und Stark, anlangt, so besteht zwischen ihnen eine nur geringe und mehr qualitative als quantitative Differenz. Bei der Vergleichung des homogenen Blaugrün mit Mischungen aus Grün und Blau erforderte N. etwas mehr Blau als St. Die Zunahme der Absorption vom Grün zum Blau ist also für N. beträchtlicher als für St. Man hätte hiernach im ganzen eine etwas stärkere Pigmentierung bei N. diagnostizieren können. Als wir aber durch Vergleichung eines homogenen Blaugrün mit Mischungen aus Rot und Blau die ganze Absorption des Blau ermittelten, zeigte sich zwischen beiden Beobachtern kein sicherer Unterschied, der betreffende Wert also nahezu übereinstimmend. Hieraus wird zu folgern sein, dafs bei Herrn St. die Absorption im Grün etwas stärker ist als bei N., dann aber gegen das Blau nicht ganz so stark zunimmt, so dafs hier wieder etwa gleiche Werte erreicht werden. Das Makula-Pigment des Herrn St. ist, wie man kurz sagen kann, ein wenig rötlicher als das des Herrn N.

Diese Differenz läfst sich naturgemäfs am sichersten in den eben erwähnten Parallelversuchen zur Anschauung bringen, und sie tritt hier trotz ihres geringen Betrages mit Deutlichkeit hervor. Um in den Ergebnissen der systematischen Mischungsversuche sich herauszustellen, dazu ist sie nicht beträchtlich genug; immerhin ist zu bemerken, dafs im Grün (etwa von 536 bis 515 $\mu\mu$) die Ordinaten der *W*-Kurve von Herrn St. merklich und, prozentisch betrachtet, nicht ganz wenig unter denjenigen des Herrn N. liegen. Doch mag dabei der Zufall auch seine Rolle spielen.

Ich wende mich nun zu dem letzten der hier zu erörternden Punkte, nämlich der Gestaltung der Blaukurven. Wie später noch darzulegen sein wird, sollten nach theoretischer Erwartung die Blaukurven in allen Fällen nahezu übereinstimmen. Berücksichtigt man indessen, dafs der Verlauf der Blaukurven, der überhaupt von 517 bis 460 $\mu\mu$ bestimmt wurde, durch die Ver-

hältnisse der Makula-Pigmentierung sehr erheblich beeinflufst werden mufs, so ist klar, dafs wir nicht hoffen dürfen, für diese Erwartung eine sehr scharfe Bestätigung zu erhalten. Zeichnen wir die vier Kurven der Blauwerte zusammen (Fig. 2), so wird deutlich, dafs sie keine irgendwie typische Differenz erkennen lassen, und man wird jedenfalls sagen dürfen, dafs Unterschiede, wie sie hier vorliegen, aus der uns bekannten

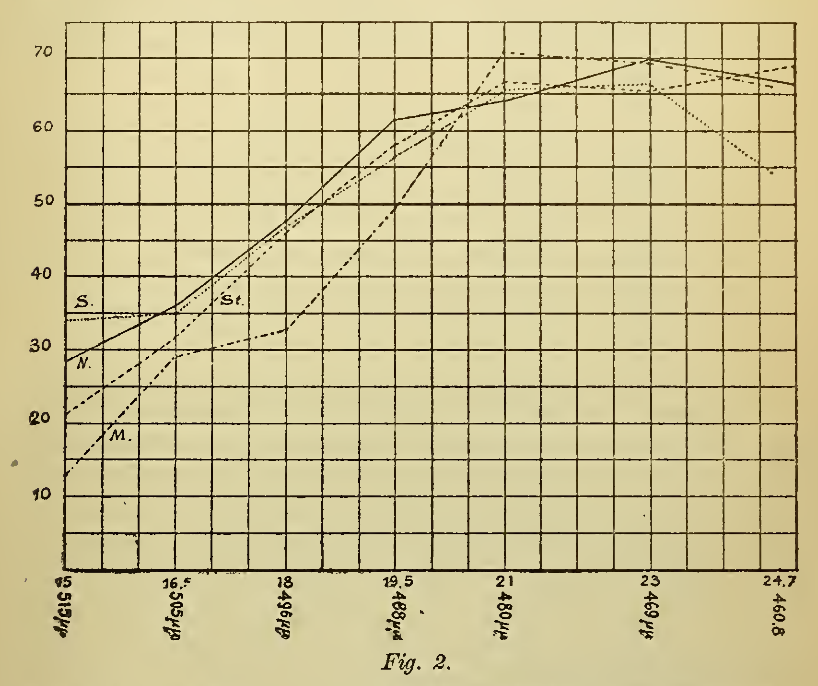


Fig. 2.

Verteilung der Blauwerte im Dispersionsspektrum des Gaslichtes für S. .... M. —.—.—. N. ——— und St. — — — —

Beschaffenheit der Makula-Pigmentierung sich sehr wohl erklären lassen.

Um in dieser Hinsicht womöglich noch etwas gröfsere Sicherheit zu erreichen, habe ich gelegentlich die Versuche in etwas modifizierter Weise noch etwas weiter hinaus, bis 436 $\mu\mu$, erstreckt und von dreien der Dichromaten in gleichzeitigen Parallelbeobachtungen die Mischungsgleichungen herstellen lassen. Um mit homogenen Lichtern Gleichungen gewinnen zu können und keine Nicolstellungen zu erhalten, die sich 90°

zu sehr annäherten, wurde hier als weniger brechbares Licht *Na*-Licht gewählt, dieses aber durch Einschaltung eines blauen Glases erheblich abgeschwächt. Die so erhaltenen Blauwerte der 3 Beobachter zeigt die nachstehende kleine Tabelle.

Tabelle V.

Spektraler Ort und Wellenlänge	Beobachter S.	Beobachter N.	Beobachter M.
[23] 469 $\mu\mu$	241	174	207
[24,7] 460,8 $\mu\mu$	210	156	192
[28] 448 $\mu\mu$	141	136	168
[31] 436 $\mu\mu$	83	69	81

Die Tabelle wie auch die graphische Darstellung in Figur 3 zeigt, dafs sich ein deutlicher Unterschied der Kurven nicht herausstellt; nur das dürfte wohl zu entnehmen sein, dafs die Kurve des Herrn S. bereits in diesem Teile beim Fortschreiten gegen die gröfseren Wellenlängen etwas schneller ansteigt, als die der anderen Herren. Doch fällt selbst dies Ergebnis noch kaum aufserhalb der Breite der Beobachtungsfehler, die wegen der relativ geringen Lichtstärken in diesen Teilen des Spektrums verhältnismäfsig beträchtliche sind.

Auch in demjenigen Punkte, der vielleicht am ehesten auffällig erscheinen wird, glaube ich einen realen Unterschied der Blaukurven nicht finden zu dürfen, dafs nämlich dieselben, indem wir vom Rot gegen das Grün vorgehen, bei den verschiedenen Beobachtern an ziemlich verschiedenen Stellen mit merklichen Werten aufzutreten beginnen. Es handelt sich hier hauptsächlich um die Schwierigkeiten, welche Nagel und ich (a. a. O. S. 9f.) bereits erörtert haben, und welche eine sehr genaue Feststellung dieser geringen Blauwerte ausschliefsen. In der That handelt es sich ja darum, ob zwischen dem langwelligen Lichte und dem untersuchten (z. B. 535 $\mu\mu$) eine Sättigungsdifferenz bemerkt wird, die dann einen Blauzusatz im

Gemisch erfordert, oder nicht. Bei dem sehr grofsen Unterschiede der Stäbchenvalenzen hängt dies in hohem Mafse von der Adaptation, aber wohl auch davon ab, wie weit der einzelne Beobachter auf das exzentrische Erscheinen der Felder achtet, was zwar nicht geschehen sollte, aber wohl kaum ganz vermieden wird. Dafs die beiden Rotblinden erst bei kleinerer Wellenlänge Blauzusätze brauchen, hängt demgemäfs wahrscheinlich zum Teil auch davon ab, dafs hier als langwelliges Licht nicht Licht von 645 $\mu\mu$ sondern *Na*-Gelb gebraucht wurde.

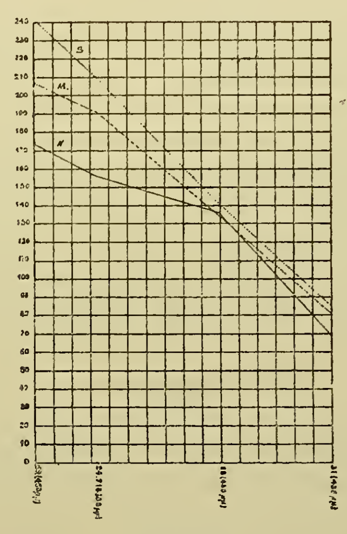


Fig. 3.

Verteilung der Blauwerte am brechbaren Ende des Spektrums für N. (Deuteranop), sowie S. und M. (Protanopen).

Stellt zwar der Rotblinde bei guter Helladaptation zwischen diesen Lichtern eine genaue Gleichung her, und ist also das eine durch das andere für rein foveale Gleichungen genau vertretbar, so ist und bleibt eben doch der Unterschied der sehr ungleichen Stäbchenvalenz bestehen. Aufserdem liegen bei 525 bis 536 $\mu\mu$ die *W*-Werte für den Rotblinden erheblich höher, als für den Grünblinden; auch dies mag dazu beitragen, dafs die geringen Blauwerte dem ersteren noch leichter als dem letzteren unter der Grenze sichrer Bemerkbarkeit bleiben. Schliefslich mufs erwähnt werden, dafs besonders für einen nicht sehr geübten

Beobachter, wie Herrn M., bei der Schwierigkeit, eine die Gleichungen deutlich und sicher verbessernde Nicolstellung zu finden, es einigermaſsen nahe liegt, auf die Benutzung des Nicol ganz zu verzichten und ihn auf der Nullstellung stehen zu lassen. Ich glaube daher, daſs man nicht wagen kann, aus den erwähnten Ungleichheiten etwas anderes zu folgern, als daſs die Blauwerte der Rotblinden bei Wellenlängen $> 515\ \mu\mu$, der Grünblinden bei solchen $> 525\ \mu\mu$ mit Vorsicht aufzunehmen sind und eine genaue Feststellung des Endverlaufs der Blaukurve nicht gelingt.

Trotz der gewissen Unsicherheit, die hier bestehen bleibt, dürfte es also wohl gerechtfertigt sein, das oben (S. 126) bereits formulierte theoretische Ergebnis noch in einer Richtung zu ergänzen, indem wir feststellen, daſs, abgesehen von den Modifikationen durch rein physikalische Verhältnisse, die Verteilung der Blauwerte im Spektrum für alle Dichromaten die nämliche ist; sie unterscheiden sich nur durch die Verteilung der Rotwerte. Die Untersuchungen lehren also, daſs neben der typischen Differenz doch auch eine ganz bestimmte Übereinstimmung zwischen den beiden Gruppen der Dichromaten besteht.

III.

Wie oben bereits angeführt wurde, habe ich von der systematischen Durchuntersuchung eines trichromatischen Farbensystems Abstand genommen, und zwar deshalb, weil einerseits eine solche ganz vollständige Untersuchung auf sehr groſse Schwierigkeiten stöſst, andererseits aber auch das Hauptinteresse sich auf wenige, relativ leichter und somit auch sicherer direkt angreifbare Punkte konzentriert. Im wesentlichen waren es zwei Fragen, über die die Untersuchungen Aufschluſs zu geben hatten; erstlich, ob die dichromatischen Systeme sich in dem oben (S. 109) auseinandergesetzten Sinne als Reduktionsbildungen aus dem trichromatischen ableiten lassen; sodann, welche Rolle innerhalb der trichromatischen Systeme die individuellen Verschiedenheiten spielen, und ob auch diese, wie die analogen der dichromatischen Systeme, sich auf Ungleichheiten der Makulafärbung zurückführen lassen. Beide Fragen gehören übrigens einigermaſsen zusammen; denn eben wegen der individuellen Verschiedenheiten innerhalb jeder

Gruppe der Dichromaten kann, wie man sogleich sieht, ein absolut scharfer Nachweis der in Frage stehenden Beziehungen nicht oder doch nur für einen Teil des Spektrums erbracht werden. Immerhin lassen sich die Dinge relativ einfach gestalten, wenn man gewisse Beschränkungen in die Untersuchung einführt.

Die Frage nämlich, ob Rotblindheit und Grünblindheit zwei verschiedene Reduktionsformen des normalen trichromatischen Farbensystems sind, hat offenbar ihre Hauptbedeutung für denjenigen Teil des Spektrums, in dem eben jene Farbensysteme sich am schärfsten und beträchtlichsten unterscheiden, d. h. für den weniger brechbaren Teil, und glücklicher Weise machen sich ja gerade in diesem Teile die „individuellen Verschiedenheiten“ noch relativ wenig geltend. Man kann jedenfalls bis zur Wellenlänge 550 herabgehen, ohne (vielleicht von seltenen Ausnahmefällen abgesehen) eine erhebliche Unsicherheit von dieser Seite zu fürchten, und man kann dabei doch auf eine sehr scharfe Prüfung des in Frage stehenden Verhältnisses rechnen, weil eben in diesem Teile die Kurven des Protanopen und des Deuteranopen am meisten charakteristisch auseinander fallen. Ich habe nun die Frage hier zunächst in einer einfachen und ganz direkten Weise in Angriff genommen, über welche an anderer Stelle[1] bereits kurz berichtet wurde, nämlich vermittelst eines von einem Trichromaten und je einem Dichromaten des einen und des anderen Typus zusammen auszuführenden Parallelversuches. Zweck desselben war, zu prüfen, ob für die Vergleichung homogener Lichter mit Mischungen aus Rot (670,8) und Gelbgrün (550 $\mu\mu$) der Satz Gültigkeit hat, daſs eine für den Trichromaten zutreffende Mischungsgleichung von beiden Dichromaten als richtig anerkannt wird, und umgekehrt, ob, mit anderen Worten, zwei Lichter für das trichromatische Sehorgan den gleichen Reiz dann darstellen, wenn sie sowohl für das Sehorgan des Protanopen als für das des Deuteranopen von gleichem Reizwert sind. Die Gültigkeit dieses Satzes läſst sich bei dem damals eingeschlagenen Wege in der That mit sehr frappierender Anschaulichkeit demonstrieren. Das Verfahren geht davon aus, daſs die Dichromaten Gleichungen zwischen dem homo-

[1] *Centralbl. f. Physiol.* 1896. S. 148.

genen Licht 670,8 und 550 $\mu\mu$ herstellen können, demgemäſs auch zwischen einem homogenen Licht irgend einer dazwischen gelegenen Wellenlänge und einem jener Lichter, oder auch endlich zwischen homogenem Licht einer zwischengelegenen Wellenlänge und irgend einer beliebigen Mischung aus 670,8 und 550. Der verschiedene Verlauf der beiden *W*-Kurven macht sich jedoch dabei darin geltend, daſs die Intensitätsverhältnisse der beiden homogenen Lichter oder des homogenen und des Gemisches für den einen und den anderen Dichromaten verschieden sein müssen. Bei Vergleichen eines homogenen Lichtes λ mit einem kürzerwelligen, $\lambda - \delta$, wird das Verhältnis ihrer Reizungswerte für den Rot- und Grünblinden sich in dem Sinne unterscheiden, daſs für den Rotblinden ein relatives Übergewicht des kurzwelligen, für den Grünblinden ein relatives Übergewicht des langwelligen Lichtes stattfindet. Wenn demnach z. B. der Grünblinde eine Gleichung zwischen Gelb (589) und Gelbgrün herstellt und der Rotblinde diese kontrolliert, so wird er das Gelb zu dunkel finden. Stellt dagegen der Grünblinde eine Gleichung zwischen demselben Gelb und einem längerwelligen Licht her, so wird diese Gleichung, vom Rotblinden kontrolliert, das Gelb zu hell erscheinen lassen. Hieraus folgt nun sogleich, daſs, wenn wir das homogene Licht mit einer Mischung aus Rot und Gelbgrün vergleichen lassen, die Abweichungen je nach dem Verhältnis, in dem die beiden Bestandteile gemischt sind, in dem einen oder dem anderen Sinne liegen können, und daſs nur ein bestimmtes Verhältnis der Anförderung genügt, daſs die vom Deuteranopen eingestellte Gleichung auch vom Protanopen als zutreffend anerkannt wird. Der Farbentüchtige andererseits kann gleichermaſsen zwischen homogenem Licht einer zwischen 670 und 550 gelegenen Wellenlänge und einer Mischung aus diesen beiden Lichtern nur bei einem ganz bestimmten Mischungsverhältnis Gleichungen gewinnen, bei welchen homogenes Licht und Mischung g l e i c h f a r b i g erscheinen. Es war zu prüfen, ob dieses für den Trichromaten eine Gleichheit ergebende Verhältnis das nämliche ist, wie dasjenige, durch welches die Bedingung erfüllt wird, daſs die Gleichung des einen Dichromaten auch für den anderen zutrifft. Da es wünschenswert war, sich von der Genauigkeit der etwa zu erhaltenden Verifizierung ein gewisses Bild zu verschaffen, so wurde in folgender Weise zu Werke gegangen. Zunächst stellte der Farbentüchtige

(ich selbst) zwischen dem homogenen Licht und der Mischung eine Gleichung her, und zwar durch Variierung des Gemisches; an diesem wurde in bekannter Weise durch Drehung des Nicolschen Prismas das Verhältnis der beiden Bestandteile, durch Regulierung der Spaltweite die Gesamthelligkeit verändert. Nach dem diese Gleichung mit gröfster Sorgfalt hergestellt war, wurde die Nicolstellung abgelesen und alsdann begannen die Einstellungen und Beobachtungen der Farbenblinden; hier hatte jedesmal der Grünblinde bei einer willkürlich gewählten Nicolstellung, die entweder mit der ebengefundenen zusammentraf oder um passende Werte in dem einen oder anderen Sinne abwich, die Felder durch Regulierung des die Mischung liefernden Spalts auf Gleichheit zu bringen, und diese Einstellung wurde alsdann vom Rotblinden betrachtet und beurteilt. Die Versuche wurden bei einem bestimmten homogenen Licht stets mit einigen verschiedenen Nicolstellungen ausgeführt, bis sich beurteilen liefs, wo die Abweichungen in dem einen und in dem anderen Sinne merkbar wurden. In der Regel wurde dann nochmals von mir die zur Erzielung von Farbengleichheit erforderliche Nicolstellung bestimmt. Die Bestimmungen wurden solcher Art für die homogenen Lichter 659, 625, 613, 589 und 569 $\mu\mu$ ausgeführt; den ganzen Versuch habe ich zweimal, einmal mit den Herren N. und S., sodann mit den Herren St. und M. gemacht. Die Ergebnisse sind in den nachstehenden Tabellen zusammengefafst.

VI.

Wellenlänge des homogenen Lichtes	Verhältnisse der Mischung, bei denen das Gemisch aus 670,8 und 550 $\mu\mu$		
	wenn dem Grünblinden gleich, für den Rotblinden		für den Trichromaten dem homogenen Licht gleichfarbig ist
	zu hell	zu dunkel	
	erscheint		
639 $\mu\mu$	0,012	0,026	0,016
625 „	0,038	0,062	0,044
613 „	0,07	0,12	0,09
589 „	0,22	0,49	0,33
569 „	1,0	3,00	1,34

VII.

Wellenlänge des homogenen Lichtes	Verhältnisse der Mischung, bei denen das Gemisch aus 670,8 und 550 μμ		
	wenn dem Grünblinden gleich, für den Rotblinden		für den Trichromaten dem homogenen Licht gleichfarbig ist
	zu hell	zu dunkel	
	erscheint		
639 μμ	0,013	0,022	0,017
625 „	0,034	0,049	0,046
613 „	0,056	0,15	0,10
589 „	0,22	0,61	0,35
569 „	0,50	4,6	1,38

Als Ergänzung ist zu diesem noch hinzuzufügen, dafs durchgängig, wenn der Versuch mit der von mir zur Farbengleichheit erforderten Nicolstellung ausgeführt wurde, die vom Grünblinden eingestellte Gleichung dem Rotblinden sowie auch mir als genau zutreffend erschien; wenigstens fand sich niemals eine sichere Differenz, und ein gelegentlich geäufserter Zweifel, ob vielleicht das eine Feld um eine geringste Spur heller oder dunkler sei als das andere, hielt sich innerhalb dessen, was oft auch derselbe Beobachter bei Nachprüfung einer vor einigen Minuten von ihm selbst eingestellten Gleichung angiebt. Im übrigen ersieht man, dafs stets, wenn das Mischungsverhältnis sich von dem für den Farbentüchtigen erforderlichen in dem einen Sinne entfernt, die vom Grünblinden gemachten Einstellungen für den Rotblinden in einem Sinne, bei entgegengesetzter Abweichung in dem entgegengesetzten unrichtig werden. Die Genauigkeit des Verfahrens ist naturgemäfs schon aus dem Grunde eine etwas geringere, da wir uns des Vorteils einer gröfseren Häufung von Einstellungen begeben, vielmehr nur die Einstellung eines Beobachters von dem anderen kontrollieren und beurteilen lassen; überdies ist die Genauigkeit selbstverständlich da eine geringe, wo das homogene Licht sich dem kürzerwelligen Bestandteile der Mischung sehr annähert. Immerhin sieht man doch, namentlich bei den homogenen Lichtern von mehr als 600 μμ, mit recht grofser Schärfe, dafs

das vom Trichromaten eingestellte Verhältnis der Mischungsbestandteile das nämliche ist, bei welchem die Gleichung des Rotblinden auch für den Grünblinden gilt. Der Versuch hat überhaupt wegen seiner Unabhängigkeit von allen Berechnungen sowie von allen etwaigen Unzuverlässigkeiten des Apparats etwas vorzugsweise Überzeugendes, und wer ihn in ähnlicher Weise und mit dem gleichen Erfolge anstellt, wird sich kaum, selbst ohne jede eingehendere theoretische Überlegung, der Ansicht verschliefsen, dafs das Sehen des Trichromaten mit demjenigen beider Dichromaten in einer ganz festen, scharf angebbaren Beziehung steht, dafs (wie ich es früher ausgedrückt habe) die beiden Gleichheitsbedingungen, die in den Sehorganen des einen und des anderen Dichromaten enthalten sind, im normalen (farbentüchtigen) Sehorgan sich vereinigt finden.

Obwohl die gestellte Frage im Grunde wohl hierdurch schon als beantwortet gelten konnte und, wie hinzuzufügen ist, auch zahlreiche einzelne nicht systematisch angestellte Beobachtungen immer wieder lehrten, dafs die Mischungsgleichungen eines Farbentüchtigen innerhalb der weniger brechbaren Spektralhälfte für beide Dichromaten gültig sind, so wollte ich doch nicht unterlassen, den Gegenstand auch in anderer Weise, nämlich durch die Berechnung von zahlreichen und systematisch angestellten Mischungsversuchen, zu prüfen, was innerhalb des gleichen Gebiets, nämlich von 670—552 $\mu\mu$, ebenfalls leicht ausführbar war. Hier nämlich gewinnt der Farbentüchtige (bei hell-adaptiertem Auge) noch ohne merkliche Sättigungsdifferenz eine Gleichung zwischen dem homogenen Licht einer mittleren Wellenlänge und einem Gemisch aus Rot (670,8) und Gelbgrün. Sind aber derartige Bestimmungen für eine Reihe homogener Lichter gewonnen, so gestatten sie ganz direkt eine Vergleichung mit den Beobachtungsergebnissen der Dichromaten. Am einfachsten gestaltet sich die Vergleichung in der folgenden Weise. Es sei gefunden (vom Farbentüchtigen), dafs die Menge Q des Lichtes λ gleich erscheint mit der Menge Q_1 roten Lichtes (670,8) und Q_2 gelbgrünen Lichtes (552 $\mu\mu$), also

$$Q\ (\lambda) = Q_1\ (670{,}8) + Q_2\ (552).$$

Bei dieser Gleichung ist dann zunächst noch zu berücksichtigen, dafs sich alle drei Quantitätsangaben, so wie wir sie direkt erhalten, auf verschiedene Spektren beziehen. Indessen

können wir vermittelst derjenigen Gleichung, bei welcher wir $\lambda = 670{,}8$ wählen und Q_2 verschwindet, den Reduktionsfaktor erhalten, mit dem wir Q_1 multiplizieren müssen, um das benutzte *Li* Rot in Einheiten desselben Spektrums auszudrücken, dem das Licht λ angehört; ebenso erhalten wir den analogen Reduktionsfaktor für das Licht 552, indem wir $\lambda = 552$ machen. Wir erhalten so durch eine einfache Umrechnung eine Reihe von Gleichungen der Form

$$Q\ (\lambda) = Q_1'\ (670{,}8) + Q_2'\ (552),$$

worin sich alle Quantitäten auf dasselbe Spektrum beziehen.

Mit Hülfe der von einem Dichromaten erhaltenen systematischen Beobachtungen, wie sie Tabelle I enthält, können wir nun direkt beurteilen, ob diese vom Farbentüchtigen eingestellten Gleichungen auch für ihn (den Dichromaten) gültige Gleichungen darstellen.

Wir hätten nämlich nur die drei Lichter mit ihren aus den Beobachtungen des Dichromaten ermittelten Reizwerten einzusetzen, also z. B. das Licht 670,8 mit 33, 552 mit 64, ebenso das homogene Licht λ mit dem seinigen, und auszurechnen, ob alsdann die beiden Seiten der Gleichung wirklich gleich werden. Ein wenig anschaulicher wird der Vergleich, wenn wir aus der Gleichung des Trichromaten denjenigen Reizwert des Lichtes λ berechnen, der demselben zur Erzielung dieser Gleichheit beigelegt werden mufs, (er wäre durch den Bruch $\frac{34\ Q_1' + 64\ Q_2'}{Q}$ gegeben) und ihn mit dem von den Dichromaten wirklich ermittelten vergleichen. Wir erhalten so eine aus den Beobachtungen des Farbentüchtigen nach Mafsgabe unserer theoretischen Auffassung berechnete Verteilung der Reizwerte für den einen und anderen Dichromaten (berechnete Kurve der Rotwerte), die sich mit den experimentell gefundenen zusammenstellen lassen. Das Ergebnis einer derartigen Berechnung zeigt die Tabelle VIII.

In graphischer Darstellung zeigt Figur 4 den Verlauf der Rot-Werte, wie er sich aus den Beobachtungen des Farbentüchtigen durch die obige Berechnung, und wie er sich direkt aus den Beobachtungen des Grünblinden ergiebt; Figur 5 enthält die analoge Darstellung für dieselben Trichromaten-Beobachtungen im Vergleich mit denen des einen Rotblinden.

Tabelle VIII.

Wellenlänge des homogenen Lichtes	Menge der Lichter 670,8 und 552 $\mu\mu$ im Gemisch		Reizwert für das Sehorgan des Grünblinden		Reizwert für das Sehorgan des Rotblinden	
	670.8	552	berechnet	beobachtet	berechnet	beobachtet
0 (670.8)	88,5	—	33	33	4,9	4,9
3 (628 $\mu\mu$)	251	10,0	106	107	28,8	38,5
4 (615 $\mu\mu$)	276	27	126	147	54,2	63
5 (603 $\mu\mu$)	270	49	145	151	86	84
6 (591 $\mu\mu$)	202	67	135	137	108	105
7 (581 $\mu\mu$)	123	76	114	124	117	113
8 (571 $\mu\mu$)	73	91	110	103	137	126
9 (561 $\mu\mu$)	21	80	76	82	111	106
10(552 $\mu\mu$)	—	71	64	64	101	101

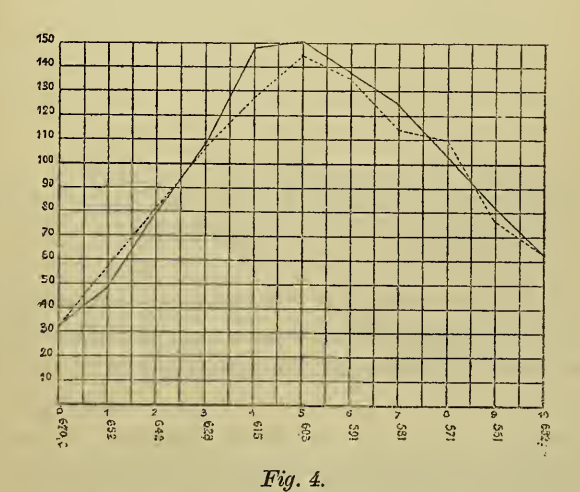


Fig. 4.

Rotwerte im Dispersionsspektrum des Gaslichtes für den Deuteranopen (Grünblinden); ——— nach den Beobachtungen von NAGEL, - - - - - - aus den Beobachtungen des Farbentüchtigen berechnet.

Berücksichtigt man, dafs selbst ein geringer Fehler in der Bestimmung eines der für die Umrechnung benutzten Werte erhebliche Störungen in der Gestalt der Kurven bringen mufs, so wird man die Übereinstimmung sehr befriedigend finden dürfen; in der That sind die Abweichungen nicht gröfser, als sie auch zwischen zwei Dichromaten des gleichen Typus, ja auch bei Wiederholungen der Versuche desselben Beobachters vorkommen. Die Gründe, welche der Genauigkeit der Beobachtung vorläufig eine Schranke setzen, sind bekannt[1], dafs aber hier

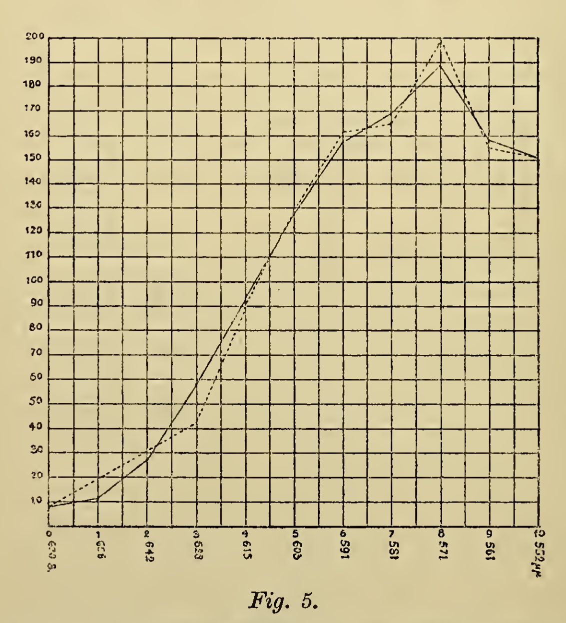


Fig. 5.

Rot- (*W*-) Werte im Dispersionsspektrum des Gaslichtes für den Protanopen; ——— nach den Beobachtungen von Marx, ------ aus den Beobachtungen des Farbentüchtigen berechnet.

Übereinstimmungen vorliegen, die eine reale Grundlage haben, nicht aber durch irgend einen Zufall vorgetäuscht werden, wird man schon nach dem Anblick jener Kurven wohl nicht ernstlich bezweifeln.

Es bestätigt sich also innerhalb des hier betrachteten Gebiets mit grosser Genauigkeit, dafs die Lichterpaare (je ein homogenes Licht und ein Gemisch aus Rot und Gelbgrün),

---

[1] Vgl. besonders die Auseinandersetzung *Zeitschr. f. Psychol.* XII. S. 36.

welche dem Trichromaten an Helligkeit und Farbe gleich sind, stets für beide dichromatische Sehorgane (das des Protanopen und das des Deuteranopen) gleichen Reizwert besitzen.

Wenn man durch die beigebrachten Thatsachen den Beweis für die mehrerwähnte Bezeichnung zwischen den normalen und den beiden dichromatischen Systemen als erbracht ansehen will, so wird nun freilich zu beachten sein, dafs er sich zunächst nur auf einen gewissen Teil des Spektrums erstreckt. Wie liegen die Dinge bezüglich der übrigen Teile, insbesondere der ganzen brechbareren Hälfte? Darauf läfst sich z. Zeit nur antworten, dafs eine genaue Prüfung irgend einer derartigen Beziehung durch die hier sehr merkbar hervortretenden individuellen Verschiedenheiten wegen der Absorption im makularen Pigment unmöglich gemacht wird, unter Berücksichtigung aber der hierdurch gegebenen Unbestimmtheit die Beobachtungen der theoretischen Erwartung durchaus entsprechen. Es ist mir allerdings bei dieser Sachlage ausreichend erschienen, das Verhältnis bei einer Kategorie von Mischungsgleichungen genauer zu verfolgen. Sowohl der Trichromat wie beide Arten der Dichromaten können aus Grün (510) und Blau (460) eine Mischung herstellen, welche homogenem Blaugrün gleich erscheint, dem Farbentüchtigen allerdings nicht ganz genau, sondern nur mit Ignorierung einer geringen Sättigungsdifferenz. Jeder stellt jedoch dabei ein ganz bestimmtes Verhältnis der beiden Mischungsbestandteile ein. Da nun nach der Erwartung der Theorie die für den Trichromaten geltenden Gleichungen auch für beide Dichromaten zutreffen sollten, so ist zu vermuten, dafs diese Mischungsgleichungen in allen drei Fällen ganz übereinstimmend ausfallen würden. Dies ist in der That der Fall, freilich mit der Modifikation, die sich eben aus dem hier erheblichen Einflusse der Makula-Pigmentierungen ergiebt: die Gleichungen dieser Art schwanken für den Farbentüchtigen und für beide Gruppen der Dichromaten in ganz ähnlichen Grenzen.[1]

[1] Wenn die Gleichungen der hier behandelten Art (von Pigmentierungsdifferenzen abgesehen) für die Rotblinden und Grünblinden genau die nämlichen wären, so würde dies besagen, dafs innerhalb dieses Gebiets die beiden Blaukurven zusammenfielen, die beiden *W*-Kurven aber einander proportional verliefen. Alsdann müfste die betreffende Gleichung

Wir sind bei dieser Sachlage, wie ich glaube, zu der Folgerung berechtigt, dafs in der That, von physikalischen Verschiedenheiten abgesehen, das Farbensystem des Rotblinden und das des Grünblinden zwei verschiedene Reduktionsformen des normalen trichromatischen darstellen. Denn wir dürfen sagen, dafs sich dies innerhalb eines gewissen Gebietes mit voller Schärfe bewahrheiten läfst; wenn andererseits innerhalb eines anderes Gebietes die individuellen Verschiedenheiten ohne typische Bedeutung einer sehr genauen Prüfung der Theorie hindernd im Wege stehen, so ist dies um so weniger von Belang, als wir ja den Grund dieser individuellen Schwankungen gut kennen und sie auf gewisse, durch direkte Beobachtung festgestellte Umstände zurückführen können. Auch dürfen wir wohl hervorheben, dafs, gerade wie das Typische in dem Unterschiede der beiden Arten der Farbenblindheit gegen eine Erklärung aus dem wechselnden Pigmentierungsverhältnisse sprach, so hier die Atypie, das Schwankende der Differenzen für eine solche rein physikalische Erklärung geltend zu machen ist. Von einer weiteren Verfolgung dieser Erscheinungskategorie durfte aber hiernach in der That Abstand genommen werden, da man mit Sicherheit rechnen konnte, nichts sehr Belehrendes weiter zu finden.

Dagegen war es von Interesse, die individuellen Verhältnisse, wie sie sich im Sehen der Farbentüchtigen geltend machen, noch etwas genauer zu verfolgen. Ich wünschte dabei erstlich, darüber einen Aufschlufs zu bekommen, welche numerischen Werte etwa diese Schwankungen erreichen, insbesondere aber auch darüber, ob, wie es von König angenommen worden ist, neben den auf der Makulafärbung beruhenden Unterschieden auch solche von anderer Art und Bedeutung (sog. anomale trichromatische Farbensysteme) vorkommen. Ich liefs zuvörderst, ganz nach dem Vorgange von Lord Rayleigh, Donders und König, Mischungen aus Rot (670,8) und gelblichem Grün

---

für den Trichromaten genau zutreffen; die geringe thatsächlich für diesen bleibende Sättigungsdifferenz beweist andererseits, dafs dies nicht ganz streng der Fall ist. Es ist danach auch für diese Gleichungen eine Typus-Differenz zu erwarten, in dem Sinne, dafs der Rotblinde etwas weniger Blau erfordert, aber sie ist von sehr geringem Betrage und demgemäfs durch die Vergleichung der verschiedenen Dichromaten wegen der starken individuellen Schwankung nicht mit Sicherheit festzustellen.

(535 $\mu\mu$) mit homogenem *Na*-Gelb vergleichen und derartige Einstellungen von einer gröfseren Zahl von Personen (Studenten) ausführen. Ich kann nun auch auf Grund meiner Erfahrungen bestätigen, dafs bei einer derartigen Untersuchung einzelne Personen gefunden werden, welche zur Erzielung der Gleichheit das Gemisch weit grüner färben müssen, als alle übrigen. Ich mufs aber gegenüber den Deutungen, welche die Beobachtungen von Rayleigh und Donders später erfahren haben,[1] betonen, dafs auch nach meiner (wie nach Königs) Auffassung diese Fälle keineswegs auf eine besonders hochgradige Makulafärbung zurückzuführen sind, sondern dafs es sich um eine abweichende Beschaffenheit der Sehsubstanzen handelt, für welche die von König gewählte Bezeichnung „anomale trichromatische Systeme" durchaus passend erscheint.

Indem ich von den beiden mir zur Beobachtung gekommenen Personen, die dieser Kategorie angehören, und auf die alsbald zurückzukommen sein wird, vorderhand absehe, will ich sogleich die Zahlen anführen, die meines Erachtens geeignet sind, uns ein wenigstens annäherndes Mafs für die Einflüsse der individuell schwankenden Makula-Tingierung zu geben. In einer ersten Reihe bewegte sich der Quotient $\frac{\text{Grün}}{\text{Rot}}$ in solchen Grenzen, dafs, der niedrigste $= 1$ gesetzt, der höchste 1,3 betrug. Wir dürften hiernach die relative Schwächung des Grün bei der gelbsichtigsten gegenüber der blausichtigsten Person auf 0,7—0,8 veranschlagen.[2] Etwas genauer seien die Ergebnisse einer zweiten (22 Studenten umfassenden) Reihe mitgeteilt. Die folgende Tabelle enthält im 1. Stabe die Nummer des Beobachters, im 2. den Quotienten $\frac{\text{Grün}}{\text{Rot}}$ in dem von dem Betreffenden angestellten, mit homogenem Gelb 589 $\mu\mu$ gleich erscheinenden Gemisch, wobei der niedrigst vorkommende $= 1$ gesetzt ist, im 3. in ähnlicher Weise den Quotienten $\frac{\text{Blau}}{\text{Grün}}$ in dem mit homogenem Blaugrün gleich erscheinenden Gemisch. Bei den Versuchen der Spalte 1 war

---

[1] Hering, Über die individuellen Verschiedenheiten des Farbensinnes. *Lotos.* VI. S. 41.

[2] Die hier benutzten Wellenlängen sind nicht genau festgestellt; annähernd war es *Li*-Rot und gelblichgrünes Licht von 525 $\mu\mu$.

Rot 670 und Gelbgrün 535 $\mu\mu$ gemischt, bei denjenigen der Spalte 2 Grün 510 und Blau 460,8 $\mu\mu$.

Nummer des Beobachters	Verhältnis $\frac{\text{Grün}}{\text{Rot}}$ in dem dem homogenen Gelb gleich erscheinenden Gemisch	Verhältnis $\frac{\text{Blau}}{\text{Grün}}$ in dem dem homogenen Blaugrün gleich erscheinenden Gemisch
I	1,0	1,05
II	1,03	1,16
III	1,05	1,42
IV	1,10	1,35
V	1,10	1,03
VI	1,14	1,62
VII	1,16	1,40
VIII	1,19	1,54
IX	1,21	1,52
X	1,23	1,18
XI	1,27	2,15
XII	1,40	1,73
XIII	1,45	1,06
XIV	1,45	1,91
XV	1,46	—
XVI	1,46	1,21
XVII	1,46	1,47
XVIII	1,49	1,00
XIX	1,51	1,73
XX	1,52	1,21
XXI	1,56	1,53
XXII	1,9	1,65

Man bemerkt, daſs sowohl in dem einen wie in dem anderen Falle die Quotienten innerhalb eines gewissen Spielraums schwanken, und daſs, wie zu erwarten, die mittleren Werte die häufigsten sind. Nicht durchgängig entspricht die Anordnung der Werte in der zweiten Kolumne derjenigen in der ersten. Zwar kommt es nicht vor, daſs Jemand, der in der ersten mit einem ganz hohen Werte figuriert, in der zweiten mit einem der niedrigsten aufträte; wohl aber sehr häufig, daſs von zwei Personen die eine in der ersten, die andere aber in der zweiten den höheren Wert darbietet. Hierin machen sich die qualitativen Verschiedenheiten des Pigments geltend; ist die Tin-

gierung bei A ein wenig rötlicher als bei B, so wird A den Quotienten $\frac{\text{Grün}}{\text{Rot}}$ höher, dagegen den Quotienten $\frac{\text{Blau}}{\text{Grün}}$ vielleicht niedriger einstellen. Wenn wir die relative Schwächung des Grün bei dem gelbsichtigsten Individuum im Vergleich zum blausichtigsten auf $\frac{1}{1,9} = 0,53$ veranschlagen dürfen und ebenso die relative Schwächung des Blau gegenüber dem Grün auf 0,6, so könnte man daraus auch sogleich die ganze relative Schwächung des Blau im Vergleich zum Rot abzuleiten versucht sein. Dieselbe würde sich nämlich durch das Produkt 0,53. 0,6 = 0,32 ergeben. Diese Berechnung wäre jedoch nur dann zulässig, wenn in beiden Fällen dasselbe Grün in den Mischungen verwendet worden wäre. Dies war nicht geschehen, um für die Untersuchung einer gröſseren Personenzahl die Einstellungen etwas leichter zu machen. Nachdem aber durch diese Voruntersuchung zwei Personen gefunden waren, die als extreme Fälle von Gelb- und Blausichtigkeit betrachtet werden konnten, lieſs ich von beiden, nämlich No. 1 und 22, dieselben Einstellungen nochmals wiederholen, und zwar so, daſs erstlich Gelb mit einer Mischung aus Rot (670,8) und Grün (517 $\mu\mu$), sodann Blaugrün mit einer Mischung aus Grün (517) und Blau (460,8 $\mu\mu$) verglichen wurde. Hier konnte dann auch durch zahlreicher wiederholte Einstellungen eine gröſsere Sicherheit gewonnen werden. Das Ergebnis war nun, daſs die relative Schwächung des Grün bei XXII gegenüber I sich auf 0,51, die des Blau im Vergleich zum Grün auf 0,61 und die ganze Schwächung des Blau auf 0,31 bezifferte.

Wenden wir, bevor wir dies Ergebnis fixieren, nunmehr unsere Aufmerksamkeit den, wie vorhin schon erwähnt, hier ausgeschiedenen Fällen zu. Der Grund, der mich veranlaſst, die Abweichung derselben von allen übrigen nicht auf die Makula-Tingierung zu beziehen, ist zunächst der, daſs die von ihnen eingestellten Quotienten $\frac{\text{Grün}}{\text{Rot}}$ gegenüber dem Spielraum, innerhalb dessen die übrigen schwanken, in entschiedenster Weise aus der Reihe fallen.

Bei der ersten Beobachtungsreihe verhielt sich bei einigen 20 Personen der niedrigste Wert des Quotienten $\frac{\text{Grün}}{\text{Rot}}$ in der

Mischung zum höchsten wie 1:1,3, zwischen welchen Extremen sich die Zahlen in unregelmäſsiger Verteilung bewegten, und von diesen erschien ganz isoliert einmal der Wert 3,8.

Bei der späteren, methodisch etwas anders geführten Reihe fand ich unter den untersuchten 22 Studenten keinen derartigen Fall, konnte aber eine Vergleichseinstellung von dem bereits von König untersuchten Herrn Professor Zehnder erhalten. Hier füllten die Zahlen der übrigen Beobachter in unregelmäſsiger Weise das Gebiet von 1 bis 1,9, während die Zahl des Herrn Z., 5,8, wiederum aus jenen vollkommen herausfiel. Die Beobachtungen von Lord Rayleigh, Donders und König haben ganz das Gleiche ergeben. Auch diese sagen, daſs die Einstellungen einer überwiegenden Mehrzahl von Personen mit Annäherung untereinander übereinstimmen, eine geringe Zahl aber sehr deutlich abweicht. Läſst man, wie ich gethan habe, auf ziemlich kleinen Feldern (etwas weniger als 2°) beobachten, so tritt der Einfluſs der Makulafärbung in den Differenzen, die sich innerhalb jener Hauptgruppe bemerklich machen, deutlicher als bei jenen Untersuchern zu Tage. Daſs aber auch die Abweichung jener ganz isolierten Fälle auf eine besonders hochgradige Pigmentierung zu beziehen sei, das dürfte wohl schon in Anbetracht eben dieser Isolierung, dieses Aus-der-Reihe-Fallens eine recht gewagte Hypothese sein. Es sprechen aber noch mehrere Thatsachen in sehr entscheidender Weise gegen dieselbe. So fand sich zunächst, daſs bei den Vergleichungen von homogenem Blaugrün mit Mischungen aus Grün und Blau die Einstellungen der beiden Herren sich von den gewöhnlichen gar nicht unterschieden. Hätte wirklich eine so exzessiv starke Makulafärbung vorgelegen, so hätte man erwarten dürfen, diese auch hier in der Einstellung eines viel blaueren Gemischs zum Ausdruck kommen zu sehen. Dies war aber keineswegs der Fall. Man könnte nun etwa meinen, daſs vielleicht in den anomalen trichromatischen Systemen sich ein qualitativ von dem gewöhnlichen verschiedenes Makulapigment bemerklich mache, nämlich ein im Grün schon sehr stark absorbierendes, d. h. also mehr ins Rote ziehendes Pigment. Ich bin vorderhand nicht im stande, diese Annahme auszuschlieſsen; zunächst aber scheint sie mir nur wenig Wahrscheinlichkeit zu besitzen; denn man müſste danach erwarten, daſs bei diesen Personen die zentral eingestellten Gleichungen zwischen homogenen

Gelb und Rot-Grünmischungen bei exzentrischer Betrachtung sehr auffällig unrichtig werden würden. Herr Prof. Z., der auf meine Bitte diesen Versuch anstellte, konnte davon überhaupt nichts bemerken. Nach alledem möchte ich, ohne weiteren Untersuchungen vorgreifen zu wollen, es vorläufig für wahrscheinlich halten, daſs die „anomalen Systeme" sich von den normalen überhaupt nicht durch einen absorbierenden Farbstoff, sondern durch eine abweichende Beschaffenheit der optischen Substanzen selbst unterscheiden.

Es dürften hiernach in der That wohl Gründe genug vorhanden sein, um die beiden erwähnten Fälle ebenso wie die ähnlichen von Lord Rayleigh, Donders und König gesehenen auszuscheiden und den Unterschied, der sie von den gewöhnlichen Trichromaten trennt, nicht in der Makula- oder Linsen-Tingierung zu suchen. Werfen wir unter Zugrundelegung dieser Annahme nochmals einen Blick auf das, was uns die Vergleichung der übrigen Personen in quantitativer Beziehung lehren kann, so sehen wir, daſs, wenn wir unter einer gröſseren Zahl von Personen den Gelb- und den Blausichtigsten aussuchen, die relative Blauschwächung bei dem letzteren etwa als eine Verminderung im Verhältnis 1 : 0,3 veranschlagt werden kann. Dies befindet sich, wie man sieht, in recht guter Übereinstimmung mit dem, was die anologen Vergleichungen an Dichromaten ergeben hatten.

Natürlich soll nicht in Abrede gestellt werden, daſs gelegentlich einmal eine noch stärkere Tingierung zur Beobachtung kommt. Ja ich will es auch nicht einmal für ausgeschlossen erklären, daſs einmal ein Fall vorkommen kann, der den Beobachter zunächst im Zweifel läſst, ob er es mit einem anomalen Trichromaten oder mit einem normalen von exzessiv starker Tingierung zu thun hat. Das aber scheint mir sicher, daſs die Untersuchung einer mäſsigen Zahl von Personen stets genügen wird, um eine solche Ausnahme als Ausnahme zu erkennen und die von uns geschilderten Gesetzmäſsigkeiten deutlich hervortreten zu lassen.

Die Ergebnisse unserer Vergleichungen lassen sich kurz folgendermaſsen zusammenfassen. Das Farbensystem des „Rotblinden" und dasjenige des „Grünblinden," stellen zwei untereinander typisch verschiedene Reduktionsformen des normalen trichromatischen dar. Innerhalb jeder dieser drei Gruppen lassen

sich die Einflüsse der lichtabsorbierenden Augenmedien (vor allem Makula-Pigmentierung) nachweisen und verfolgen; was wir hier finden, entspricht qualitativ der durch direkte Untersuchungen festgestellten Beschaffenheit des Makula-Pigments (im Gelbgrün beginnende und gegen das blaue Ende hin kontinuierlich zunehmende Absorption) und bewegt sich quantitativ innerhalb derselben Grenzen. Approximativ läfst sich hierfür angeben, dafs bei stark gelbsichtigen Personen das Blau (460,8 $\mu\mu$) gegenüber langwelligem Licht auf etwa $^1/_3$ desjenigen Wertes geschwächt ist, den es für stark Blausichtige besitzt. Das Vorkommen noch erheblicherer Differenzen kann nicht bestritten werden, dürfte aber gewifs schon ziemlich selten sein. In den meisten Fällen sind die Differenzen weit geringer, so dafs das oben erwähnte Verhältnis des protanopischen und deuteranopischen Farbensystems zu dem normalen dadurch nur wenig an Deutlichkeit verliert.

Die soeben dargelegte Beziehung der dichromatischen Systeme zu dem normalen trichromatischen ist nun offenbar von gröfster Bedeutung auch für die Beurteilung ihres gegenseitigen Verhältnisses. Konnte bei ihrer Vergleichung untereinander noch irgend ein Zweifel darüber bestehen bleiben, ob der Unterschied zwischen ihnen nicht vielleicht doch physikalisch (d. h. durch ein lichtabsorbierendes Pigment) zu erklären sei, so wird dieser Zweifel nunmehr vollends schwinden müssen. In der That, wenn ein dichromatisches System zu dem trichromatischen in der einfachen und scharfen Beziehung einer Ausfallserscheinung steht, kann es unmöglich ihm gegenüber durch die Vorschaltung eines starken absorbierenden Mediums beeinflufst sein; da dies für beide dichromatische Systeme gilt, so können sie auch untereinander sich nicht in dieser Weise unterscheiden. Wir können schlechterdings beide nur als verschiedene Reduktionsformen des normalen, mithin ihren Unterschied auch als einen physiologischen auffassen. Wenn vollends, (wie dies von anderer Seite angenommen worden ist), die Unterschiede der beiden Dichromaten nichts Anderes darstellten, als eine, in gleicher Weise auch innerhalb der normalen Systeme vorkommende individuelle Differenz, so könnte man nur erwarten, dafs die Mischungsgleichungen gewisser farbentüchtiger Personen von den einen, gewisser von anderen Dichromaten anerkannt würden; ein Verhalten aber, wie wir es in dem weniger

brechbaren Teile des Spektrums finden, wäre danach nicht nur der merkwürdigste Zufall, sondern überhaupt ganz undenkbar. Aber auch die zwischen den beiden dichromatischen Systemen angenommene Übereinstimmung (die Gleichheit der Blau-Kurven) gewinnt unverkennbar an Sicherheit, wenn, was sich hier zeigt, auch die normalen farbentüchtigen Personen sich hier mit Annäherung gleich verhalten, resp. ähnliche Schwankungen bemerkbar werden. Wenn, woran kaum Jemand zweifeln dürfte, diese bei den farbentüchtigen Personen vorkommenden individuellen Differenzen in der mehrerwähnten Weise rein physikalisch sich erklären, so werden wir um so mehr berechtigt sein, die gleiche Deutung auch auf die analogen Schwankungen in den dichromatischen Systemen anzuwenden.

Im Interesse möglichster Vollständigkeit sei endlich noch ein Bedenken berührt, das sich etwa aufdrängen könnte. Könnte nicht doch vielleicht der Unterschied der beiden Dichromaten-Gruppen identisch sein mit dem Unterschied des normalen und des „anomalen Trichromaten"? Haben wir nicht, indem wir diese letzteren von der Betrachtung ausschlossen, durch eine doch nicht ganz sichere Auffassung gerade diejenigen Thatsachen bei Seite geschoben, welche zu einer ganz andersartigen Anschauung auch von den dichromatischen Systemen hätten führen können? Der Einwurf läfst sich leicht abweisen. Im Grunde ist er eigentlich schon durch die soeben gemachten Bemerkungen erledigt; wenn für beide Dichromatengruppen die Gleichungen des normalen Trichromaten zutreffen, so werden wir doch kaum daran denken können, der einen derselben eine Beschaffenheit des anomalen Trichromaten zuzuschreiben, für welchen dies nicht der Fall ist. Aber auch abgesehen hiervon scheitert der Versuch, den Unterschied der beiden Dichromatenarten mit demjenigen des normalen und des anomalen Trichromaten zu identifizieren, hoffnungslos bei jeder genaueren Prüfung. Das allerdings versteht sich ja von selbst, dafs, rein qualitativ genommen und an einer einzigen Gleichung geprüft, die Unterschiede sich gleichartig darstellen: der eine z. B. braucht relativ mehr, der andere relativ weniger Grün. In dieser Weise mufs sich natürlich jede Differenz in der Bildung der Sehorgane geltend machen, von welcher Art sie auch sei. Aber die Übereinstimmung beruht hier nur auf der Beschränktheit des Vergleichs, die etwas Anderes, als

dieses Mehr oder Weniger an Grün gar nicht ins Auge faſst. Sie hört hier z. B. schon auf, wenn wir zu quantitativer Betrachtung übergehen. Wir müſsten z. B., wie oben gezeigt, um die Gleichungen eines Rot- und eines Grünblinden zur Übereinstimmung zu bringen, annehmen, daſs das Grün (517 $\mu\mu$) relativ zum *Li*-Rot im Auge des letzteren auf 0,1 seines Wertes geschwächt wurde. Im Auge des anomalen Trichromaten ist aber, selbst gegenüber dem schwächst pigmentierten normalen, um ein bestimmtes Gelb zu erhalten, nicht die 10fache, sondern nur die 3,5—5,6fache Menge von Grün erforderlich. Schon der erste Versuch einer quantitativen Parallelisierung scheitert also. Eine weitere Durchführung zeigt die Unmöglichkeit dieser Auffassung noch deutlicher, wie den Ergebnissen Königs zu entnehmen ist. Ich verzichte auf ihre Darlegung, da ich selbst über systematisch ausgedehnte Beobachtungen eines anomalen Trichromaten noch nicht verfüge. Es darf wohl auch hiervon abgesehen werden, weil ohnehin, wie ich glaube, die scharfe Beziehung, in welcher die Dichromaten zum normalen trichromatischen Farbensystem stehen, eine Heranziehung des anomalen zu ihrer Erklärung ausschlieſst.

IV.

Verhältnismäſsig kurz kann ich mich über das sog. monochromatische System, d. h. über das Sehen des mit angeborener totaler Farbenblindheit Behafteten, fassen. Ich habe unlängst Gelegenheit gehabt, an einem solchen Falle Beobachtungen anzustellen. Es handelte sich um ein junges Mädchen aus Urach in Württemberg, welches vor längerer Zeit schon in der Tübinger Augenklinik wiederholt untersucht, Herrn Dr. Nagel erinnerlich war. Durch die sehr gütigen Bemühungen des Herrn Oberamtsarztes Kammerer gelang es, die Patientin zu einer Reise hierher und einem achttägigen Aufenthalt in der hiesigen Augenklinik zu bestimmen, wodurch zugleich die Möglichkeit wiederholter Untersuchungen im physiologischen Institut gegeben war. Die Patientin war recht intelligent und beobachtete sorgfältig. Es zeigte sich alsbald, daſs sie zwischen je zwei beliebigen homogenen Lichtern durch bloſse Variierung der Lichtstärke eine genaue Gleichung erhalten konnte, daſs sie in der That total farbenblind war. Es handelte sich unter diesen

Umständen vor allem darum, die Verteilung der Helligkeit im Spektrum zu verfolgen. Dies geschah, indem zwischen einem konstant gehaltenen Vergleichslicht und einer passend gewählten Reihe homogener Lichter Gleichungen hergestellt wurden. Zu möglichster Vermeidung von Fehlerquellen wurde auch hier die Reihe der homogenen Lichter erst in der Richtung vom Rot zum Blau und dann wieder zurück durchgegangen.

Die Versuche bestätigen, daſs die Helligkeitsverteilung

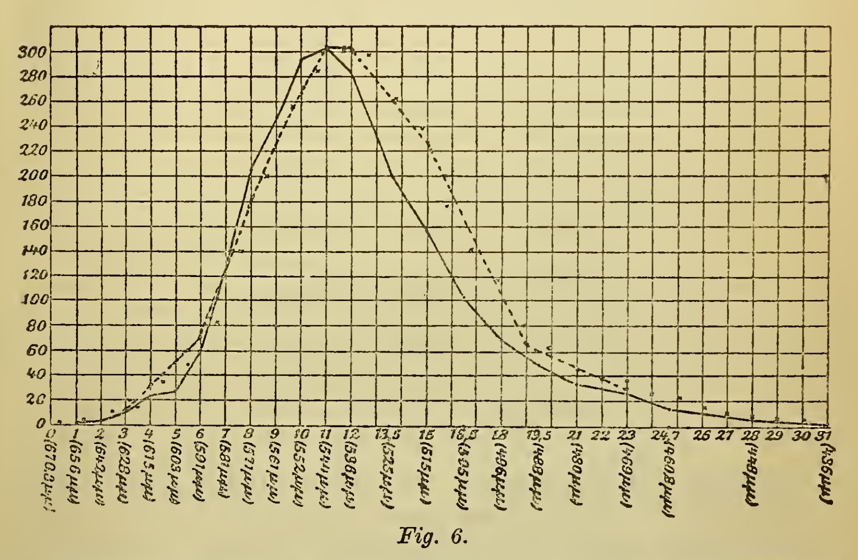


Fig. 6.

Helligkeiten für den total Farbenblinden ------ und Dämmerungswerte (nach Dr. Nagel) ——— im Dispersionsspektrum des Gaslichtes. ×××× ältere Beobachtungen von Dr. Nagel.

im Spektrum für den total Farbenblinden mit groſser Annäherung übereinstimmt mit derjenigen, die der Dichromat (oder Trichromat) beim Dämmerungssehen besitzt. Ich habe, um dies ersichtlich zu machen, in Fig. 6 die von M. Binder bestimmten Helligkeitswerte mit den von Dr. Nagel ermittelten Dämmerungswerten zusammengezeichnet. Die erstere Kurve (die punktierte) fällt, wie man sieht, mit der letzteren genügend nahe zusammen, um ihre Übereinstimmung zu erschlieſsen, und noch etwas besser stimmt sie mit den durch die Kreuze dar-

gestellten früheren Beobachtungen Dr. NAGELS.[1] Die Zahlenwerte sind in Tabelle IX zusammengestellt.

Tabelle IX.

Spektraler Ort der homogenen Lichter	Helligkeit für M. BINDER	Dämmerungswerte für Dr. NAGEL
3 (628 $\mu\mu$)	124	110
6 (591 $\mu\mu$)	720	600
8 (571 $\mu\mu$)	1810	2060
10 (552 $\mu\mu$)	2650	2930
11 (544 $\mu\mu$)	3020	3030
12 (536 $\mu\mu$)	3050	2820
15 (515 $\mu\mu$)	2280	1580
19 (491 $\mu\mu$)	850	556
23 (469 $\mu\mu$)	325	260

Obgleich dieses Resultat mit dem übereinstimmt, was früher schon von HERING und von KÖNIG gefunden worden ist, so lehren doch unsere Beobachtungen im Vergleich mit jenen etwas Neues. Aus verschiedenen Gründen nämlich war es wichtig, festzustellen, ob für das Sehorgan des total Farbenblinden ein merkbarer Unterschied zwischen Hell- und Dunkelgleichungen stattfände. Man konnte hierüber, in Ermangelung direkter Bestimmungen, einigermafsen im Zweifel sein; da aber die von HERING und von KÖNIG an ihren total Farbenblinden gewonnenen Gleichungen weder strenge Hell- noch Dunkelgleichungen waren, so erschien auch die Bedeutung der gefundenen Übereinstimmung mit dem Dämmerungssehen des Di(oder Tri)chromaten nicht ganz klar. Die obigen von M. BINDER erhaltenen Gleichungen waren nun Hellgleichungen; sie wurden

[1] Vergl. *Zeitschr. f. Psychol.* XII. S. 12f.

im nicht verdunkelten Zimmer eingestellt, natürlich unter Vermeidung starker Blendung, welche die total Farbenblinden ja nicht vertragen, jedenfalls aber bei ziemlich starker Helladaptierung. Eine ähnliche Reihe von Dunkelgleichungen von unserer Beobachterin zu erhalten, erschien unmöglich, da diese Einstellungen zu schwierig sind und eine große Übung und Sicherheit in der Benutzung des Apparates erfordern. Wir haben jedoch wenigstens in Einzelfällen hierauf zielende Vergleichungen angestellt, vornehmlich so, daſs nach mehr als halbstündiger Dunkeladaptation bei geringen Lichtstärken eine Dunkelgleichung hergestellt wurde und wir diese dann bei proportional sehr vermehrter Lichtstärke und mit helladaptiertem Auge prüfen lieſsen. Wir haben hierbei niemals ein Resultat erhalten, was auch nur mit einiger Wahrscheinlichkeit auf eine Differenz hätte schlieſsen lassen. Man kann daher wohl folgern, daſs die Gleichungen des total Farbenblinden, wenn überhaupt, jedenfalls nicht in erheblichem Maſse vom Adaptationszustand des Auges abhängig sind.

Besser als am Spektralapparat lieſsen sich von unserer Beobachterin Dunkelgleichungen mit rotierenden Scheiben gewinnen, und es war dabei zugleich für Dr. Nagel wie für mich möglich, diese Gleichungen unsererseits zu kontrollieren. Da wir sie stets mit gröſster Annäherung gültig fanden, so wird man schlieſsen dürfen, daſs das Dämmerungssehen des total Farbenblinden mit dem des Di(und Tri)chromaten übereinstimmt. Da aber andererseits auch, wie die ersterwähnten Versuche lehren, die Hellgleichungen des total Farbenblinden mit den Dämmerungsgleichungen des Dichromaten stimmen, so bestätigt sich auch hierin, daſs zwischen Hell- und Dunkelsehen des total Farbenblinden hinsichtlich der Helligkeitsverhältnisse verschiedener Lichter keine, jedenfalls keine sehr erhebliche Differenz besteht.

Wenn es hiernach zulässig erscheint, von dem Farbensystem eines Monochromaten schlechtweg und ohne erläuternden Zusatz zu sprechen, so können wir uns bezüglich der theoretischen Folgerungen sehr kurz fassen. In einer früheren Arbeit wurde auseinandergesetzt, daſs zwei für den Grünblinden helläquivalente Lichter sich bezüglich ihrer Dämmerungswerte sehr beträchtlich unterscheiden können; wir können hinzufügen, daſs sie dem Monochromaten äuſserst ungleich erscheinen

können, und wir folgern, dafs das monochromatische System keine Reduktionsform des grünblinden (d. h. des durch die Hellgleichungen des Grünblinden gegebenen) ist. Ganz das Gleiche gilt aber auch, kaum minder deutlich, für das rotblinde Farbensystem. Stellen wir in ähnlicher Weise, wie wir es dort für das grünblinde gethan haben, so auch für das rotblinde System für eine Reihe helläquivalenter Lichterpaare das Verhältnis ihrer Dämmerungswerte (oder der Helligkeiten, mit denen sie von dem total Farbenblinden gesehen werden) zusammen, so erhalten wir Folgendes:

Spektraler Ort und Wellenlänge	Dämmerungswert des homogenen Lichts *dh*	Dämmerungswert des Rotanteils im Gemisch	Dämmerungswert des Blauanteils im Gemisch	Ganzer Dämmerungswert des Gemischs *dg*	Verhältnis des Dämmerungswerts des homogenen Lichts zu dem des hell-äquivalenten Gemischs $\frac{dh}{dg}$
2 (642)	36	36		36	1,0
3 (628)	110	77		77	1,9
4 (615)	254	126		126	2,0
5 (603)	276	168		168	1,6
6 (591)	599	210		210	2,8
7 (581)	1276	226		226	5,7
8 (571)	2061	252		252	8,2
9 (561)	2477	212		212	11,7
10 (552)	2930	202		202	14,5
11 (544)	3027	170		170	17,6
12 (536)	2820	135		135	20,9
13,5 (525)	2055	94		94	21,8
15 (515)	1576	66	23,5	89,5	17,7
16,5 (505)	1015	34	64	98	10,4
18 (496)	697	17	73	90	8,7
19,5 (488)	486	10,6	108	119	4,1
21 (480)	318	5,8	157	163	1,9
23 (469)	263	2,0	153	155	1,7
24,7 (460,8)	146	—	146	146	1,0

Wie man sieht, besitzen auch die für den Rotblinden helläquivalenten Lichterpaare vielfach stark ungleiche Dämmerungswerte und sind also auch für den Monochromaten sehr ungleichwertig. Das monochromatische Farbensystem ist also, wie hieraus hervorgeht, ebensowenig eine Reduktionsform des rot-

blinden wie des grünblinden. Findet sich also, wie man sagen dürfte, die Gleichheitsbedingung des monochromatischen Systems weder im rotblinden, noch im grünblinden System wieder, und sind andererseits im normalen trichromatischen System die Gleichheitsbedingungen der beiden dichromatischen vereinigt, so folgt unmittelbar, dafs das monochromatische auch keine Reduktionsform von jenem (dem normalen trichromatischen) sein kann.

Etwas greifbarer können wir im Sinne irgend einer Komponenten-Theorie sagen, dafs von den drei Bestandteilen des farbentüchtigen Hellapparates je zwei in demjenigen der Dichromaten sich finden; da der einheitliche Apparat, der das Sehorgan des total Farbenblinden ausmacht, weder mit einem des grünblinden noch mit einem des rotblinden übereinstimmt, so kann er auch mit keinem von den dreien des farbentüchtigen Hellapparates identisch sein.

Die Sätze, zu denen wir hier gelangen, sind vor längerer Zeit schon von König aufgestellt worden, der durch ganz direkte Vergleichung fand, dafs der total Farbenblinde weder die Gleichungen der Trichromaten noch diejenigen der Dichromaten, sofern diese bei hoher Lichtstärke eingestellt sind, als für ihn zutreffend anerkennt. Es liegt in der Natur der Sache, dafs diese Differenzen bei den Gleichungen des Farbentüchtigen nicht auf so hohen Grad gesteigert werden können, wie dies für die Hellgleichungen des Dichromaten möglich ist. Ob Hellgleichungen des Farbentüchtigen dämmerungsungleich sein können, ist demgemäfs noch unlängst bezweifelt worden. Ich glaube zwar, dafs man diese Zweifel schon im Hinblick auf die früher von mir erwähnten Versuche, noch mehr wohl angesichts der neuerdings von König[1] mitgeteilten Beobachtungen als erledigt gelten lassen darf; immerhin wird, wenn sich die Gleichungen des Farbentüchtigen für den total Farbenblinden unrichtig erweisen, zunächst die Einrede möglich sein, dafs hier nur geringfügige und vielleicht auf Pigmentierungs-Verhältnissen beruhende Unterschiede vorliegen. Ich habe aus diesem Grunde von der Anstellung derartiger direkter Vergleichungen zwischen Farbentüchtigen und total Farbenblinden

---

[1] König, Quantitative Bestimmungen an komplementären Spektralfarben. *Sitzungsber. der Berl. Acad.* 1896. S. 945.

abgesehen. Die Feststellung, auf die es uns ankommt, gewinnt durch den indirekten Weg unter Bezugnahme auf den Dichromaten ganz ausserordentlich an Sicherheit. Darüber kann nicht der mindeste Zweifel bestehen, dafs die Gleichheitsbedingungen des monochromatischen Systems weder im rotblinden noch im grünblinden Hellapparat sich wieder finden; auch daran, dafs das trichromatische die Gleichheitsbedingungen des rot- und des grünblinden vereinigt, kann, wie ich glaube, ein ernsthafter Zweifel nicht mehr bestehen. Hiernach ist denn auch die Beziehungslosigkeit des total farbenblinden Systems zu dem normalen farbentüchtigen Hellapparat von dieser Seite noch sicherer gestützt, als es durch den direkten Vergleich geschehen kann.

Obgleich es nicht meine Absicht ist, an dieser Stelle alle vorkommenden Anomalien des Farbensinnes zu behandeln, insbesondere z. B. die Farbenblindheit der Netzhautperipherie, auf die ich in kurzem zu kommen hoffe, hier ganz aufser Betracht bleiben soll, so werden doch einige Bemerkungen bezüglich der Formen am Platze sein, für die eine analoge Auffassung am nächsten liegt und auch vielfach versucht worden ist, nämlich die Blau- resp. Gelb-Blau-Blindheiten. Bei der Seltenheit der Fälle und mangels eigener Beobachtungen mufs ich mich hier freilich sehr kurz fassen. Derjenige Fall dieser Art, welcher am ehesten eine Beurteilung gestattet, ist der neuerdings von Vintschgau und von Hering beschriebene. H. gelangt, indem er den Fall vom Standpunkt seiner Theorie aus analysiert, zu der Annahme, daft es sich um eine Gelb-Blau-Blindheit mit Schwäche des Rot-Grün-Sinnes handelt, zu welchen qualitativen Anomalien aber noch eine quantitative von der Art kommt, dafs die Reizwerte der kurzwelligen Lichter relativ zu den Reizwerten der langwelligen kleiner sind, als für das normale Auge.

Es wurde schon Eingangs betont, dafs man bei einer derartigen Sachlage nicht mehr von einer Bestätigung der Theorie reden darf; der Fall ist lediglich durch einige nicht sehr befriedigende Hülfsannahmen mit der Theorie in Einklang gebracht. Man wird zu wissen wünschen, ob er sich als eine Blaublindheit im Helmholtzschen Sinne auffassen läfst. In dieser Hinsicht können wir Folgendes sagen. Den nach dieser Annahme zu bildenden Erwartungen entspricht es, dafs ein gewisser

Punkt im Gelb die gleiche Empfindung wie das gemischte weisse Licht (vermutlich wohl eine farblose) hervorruft. Daſs das Gleiche auch vom spektralen Blau gilt, wird auf den ersten Blick nicht ganz im Einklang mit der Theorie erscheinen, denn aller Wahrscheinlichkeit nach liegt hier die Erregbarkeitskurve der Grünkomponente merklich höher, als die der Rotkomponente, man könnte also erwarten, daſs das spektrale Blau durchweg grünlich gesehen würde. Indessen löst sich diese Schwierigkeit vielleicht zusammen mit einer anderen weit beachtenswerteren. H. fand, daſs der Farbenblinde Gleichungen zwischen spektralem Gelb und Blau herstellen konnte; das Helligkeitsverhältnis, welches hier den beiden Lichtern gegeben werden muſste, war nicht das, welches H. erwartete, bei welchem die beiden Lichter gleiche „Weiſsvalenz", d. h. in unserem Sinne gleichen Dämmerungswert, gehabt hätten, vielmehr muſste das Blau doppelt so stark genommen werden.

Obwohl nun dies dem Sinne nach den nach der Helmholtzschen Theorie zu bildenden Erwartungen entspricht, so sieht man doch sogleich, daſs, wenn es sich um eine Gleichung für einen blaublinden Zapfenapparat gehandelt hätte, die Differenz noch viel beträchtlicher hätte sein müssen. Berechnen wir die Gelbmengen, die einem bestimmten Quantum Blau einerseits an Wirkung auf die Stäbchen, andererseits an Wirkung auf die Rot- und Grün-Komponenten gleichkommen, so müſste die letztere zwar je nach der Wellenlänge des benutzten Blau verschieden, jedenfalls aber das 10—15fache von der ersteren sein. Hiernach scheint es, daſs der Fall sich auch im Sinne der Helmholtzschen Komponenten nicht glatt, d. h. nicht als reine Ausfallserscheinung deuten läſst. Indessen hängt dieser Widerspruch doch an einer Voraussetzung, nämlich der, daſs die betr. Gleichungen wirklich Hellgleichungen, oder, wie wir besser sagen dürfen, Zapfengleichungen waren. Eben dies ist wohl in hohem Grade fraglich. Die sonstigen Verhältnisse des Falles, die zu wiederholen hier überflüssig ist, nötigten Hering zu der Annahme, daſs auch die „rotgrüne Sehsubstanz" gegenüber normalen Verhältnissen sehr reduziert sei. Der hiermit gegebenen Annahme, daſs der Fall sich einigermaſsen der totalen Farbenblindheit annähere, können wir wohl in unserem Sinne auch zustimmen; der Zapfenapparat, des Blaubestandteils ganz entbehrend, könnte überhaupt stark Not ge-

litten haben, so daſs seine Effekte gegenüber denen der Stäbchen ziemlich zurücktreten. Alsdann wäre zu verstehen, daſs wir unter Umständen, die sonst zur Gewinnung von Hellgleichungen schon annähernd genügen, hier Gelb-Blauverwechselungen erhalten, welche sich von den für die Stäbchen gültigen zwar merklich, aber doch nicht so erheblich entfernen, wie wenn es sich um Zapfengleichungen handelte. Hierin könnte dann auch zugleich die Erklärung dafür gefunden werden, daſs kurzwelliges Blau nicht, wie erwartet, grün, sondern farblos gesehen würde.[1]

Ob diese Auffassung sich gegenüber weiteren Untersuchungen des Falles bewähren wird, steht natürlich dahin. Selbstverständlich bezwecke ich mit seiner Erörterung nichts weiter als den Nachweis, daſs seine Eigentümlichkeiten auch auf dem Boden unserer theoretischen Anschauungen einigermaſsen verständlich gemacht werden können. Ob aber diese seltenen und verwickelten Fälle gerade sehr geeignet sind, uns theoretisch wichtige Aufschlüsse zu geben, das ist freilich eine ganz andere Frage.

V.

Die Beziehungen des normalen trichromatischen Systems zu den dichromatischen stellen sich den obigen Untersuchungen zufolge, wenn wir von den abweichenden Verhältnissen des Dämmerungssehens abstrahieren, ganz ebenso dar, wie sie von Helmholtz in der ersten Auflage der *Physiol. Optik* aufgefaſst worden sind. Wir können im Grunde nur behaupten, für diese Anschauungen neuerlich vollständigere und systematische Beweise beigebracht zu haben, und wir sind andererseits in der Lage, die Rolle, welche hier die individuellen Verhältnisse der Makula-Färbung spielen, mit groſser Genauigkeit zu verfolgen, was damals noch nicht möglich war. Wie aber schon erwähnt, ist nun in der Zwischenzeit eine ganz andere Auffassung jener Beziehungen von Hering entwickelt und vertreten worden, welche, kurz gesagt, darin gipfelt, daſs es nur eine Rot-Grün-

---

[1] Es wäre von besonderem Interesse, zu erfahren, ob der Farbenblinde auch unter den Bedingungen des Dämmerungssehens ein von dem normalen abweichendes Helligkeitsverhältnis zwischen Gelb und Blau zeigte.

blindheit gebe, und daſs der vielbesprochene Unterschied der beiden Typen nichts Anderes sei, als die in ganz gleicher Weise an den Farbentüchtigen zu beobachtenden Unterschiede einer relativen Gelb- oder Blausichtigkeit, welche hauptsächlich auf stärkerer oder schwächerer Makula-Färbung beruhen. Es ist gewiſs, daſs sich Herings Darstellung alsbald sehr viele Freunde erworben hat; eine kritische Erörterung der zu ihrer Stütze vorgebrachten Argumente scheint mir daher hier unerläſslich; denn selbst der Leser, der unserer obigen Darstellung zustimmend gefolgt ist und sie für beweiskräftig gelten läſst, wird ein berechtigtes Interesse haben, zu erfahren, wie es eigentlich kommen konnte, daſs ein in der Hauptsache von Anfang an (nämlich schon von Seebeck) ganz richtig erfasster Sachverhalt für eine gewisse Zeit bestritten und verkannt werden konnte. Wir werden uns, um hierüber Aufschluſs zu erhalten, mit den beiden Arbeiten Herings „Zur Erklärung der Farbenblindheit aus der Theorie der Gegenfarben" (*Lotos*, I. S. 76, 1880) und besonders mit der späteren „Über individuelle Differenzen des Farbensinns" (*Lotos*, VI. S. 142, 1885) zu beschäftigen haben.

Was zunächst die individuellen Differenzen anlangt, wie sie innerhalb der trichromatischen Farbensysteme sich bemerkbar machen und aus der Ungleichheit der Makula-Färbung sich erklären lassen, so war auf dieselben schon mehrfach hingewiesen worden. Von Frey und mir[1] war der Einfluſs derselben auf die Mischungsgleichungen in systematischer Weise dargestellt und gezeigt worden, daſs die Verschiedenheiten zwischen uns beiden von der Art waren, wie sie aus solchen Absorptionsverhältnissen sich erklären lieſsen. Eine wertvolle Vervollständigung unserer Kenntnisse in dieser Beziehung boten die auf Herings Veranlassung unternommenen Beobachtungen von Sachs,[2] welcher durch spektroskopische Untersuchung herausgeschnittener menschlicher Netzhäute die optische Beschaffenheit des Pigments im gelben Fleck feststellte. Es ergab sich, daſs die Absorption bereits im Grüngelb bemerklich wird, um gegen das brechbare Ende hin immer stärker zu werden, wobei

---

[1] v. Frey und v. Kries, Über Mischung von Spektralfarben, *Arch. f. Physiol.* 1881. S. 336.

[2] Sachs, *Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol.* L. S. 574.

die Hauptzunahme in der Regel in der Gegend der Wellenlänge 500 (jedoch individuell ziemlich wechselnd) erfolgt. Über die Absorptionsverhältnisse normaler Maculae konnten die Sachsschen Untersuchungen, wie Hering selbst später noch besonders betont hat, nur in qualitativer, aber nicht in quantitativer Beziehung Aufschlufs geben. Um zu prüfen, ob den Makula-Färbungen ein Anteil an der immer konstatierten Differenz der beiden Arten der Farbenblindheit zuzuschreiben sei, war es aber erforderlich, auch irgend eine quantitative Vorstellung von der Bedeutung dieser individuellen Differenzen sich zu bilden. Dies ist auf S. 23 (im S.-A.) der oben erwähnten Arbeit versucht worden; mir scheint, dafs die hier niedergelegten Untersuchungen und Überlegungen H. zu einer beträchtlichen Überschätzung dieser Einflüsse geführt haben. Hering ist bei diesen Versuchen so zu Werke gegangen, dafs verschiedenen Beobachtern die Aufgabe gestellt wurde, eine Mischung aus Rot (660 $\mu\mu$) und Rotblau (447 $\mu\mu$) so einzustellen, dafs das Gemisch „rein rot", d. h. weder gelblich noch bläulich erschien. Die hierbei gefundenen Quotienten $\frac{R}{B}$ bewegten sich hier für 5 Beobachter zwischen 1,15 und 7,0. Gegen die hieraus abzuleitende Bewertung der Makula-Absorption wird nun Jedermann das Bedenken geltend machen, dafs es doch keineswegs feststeht, ob wirklich das reine Rot eine so ausgezeichnete und wohl charakterisierte Empfindung ist, dafs es mit hinreichender Sicherheit und von allen Personen übereinstimmend eingestellt werden kann. Dieses Bedenken ist auch durch die vorausgeschickten Kontrollversuche, bei denen die rein grün, blau und gelb erscheinenden homogenen Lichter aufzusuchen waren, keineswegs entkräftet; denn es ergab sich z. B. (a. a. O. S. 22 des S.-A.), „dafs zwar das Gebiet der Einstellung, innerhalb dessen reines Grün gesehen wurde, für beide Beobachter verschieden grofs, und überdies, dafs das des einen Beobachters gegen das des anderen verschoben war, dafs sich aber die beiden Gebiete teilweise deckten, so dafs ein engeres Einstellungsgebiet gegeben war, innerhalb dessen beide Beobachter dasselbe homogene Licht bei wiederholter Einstellung als rein grün bezeichneten". Es erscheint nicht berechtigt, wenn Hering danach fortfährt: „Es war somit nochmals und ganz genau festgestellt, dafs S. und B. ein Licht von bestimmter Wellenlänge beide als rein grün beziehungsweise

gelb oder blau bezeichneten, und dafs daher die Verschiedenheit ihrer Bezeichnungen für die oben erwähnten grünen Pigmentfarben nicht darauf beruhen konnte, dafs Jedem von Beiden sozusagen ein anderes Ideal des reinen Grün vorschwebte. Denn diesenfalls hätten nicht Beide ein und dasselbe Spektralgrün gleich, d. h. als reines Grün bezeichnen können.“ Nicht darauf kam es an, ob ein Grün zu finden war, welches beide Beobachter noch für rein gelten liefsen, sondern, ob bei der Aufgabe, reines Grün einzustellen, stets oder wenigstens durchschnittlich dasselbe Licht gefunden wurde. Waren, wie angegeben, die beiden Einstellungsgebiete gegeneinander verschoben, so war im Gegenteil daraus mit Wahrscheinlichkeit zu folgern, dafs Jedem von Beiden ein etwas anderes Ideal des reinen Grün vorschwebte, und in der Beurteilung unreiner Pigmente konnte dies Moment neben anderen zur Geltung kommen. Auch bei den Spektralfarben kam es doch vor, (das besagt ja die Verschiebung der Gebiete) dafs eine bestimmte Farbe der eine noch für rein grün gelten liefs, der andere aber nicht mehr. Wie grofs diese Unterschiede gewesen sein mögen, erfahren wir nicht; es ist auch ohne grofsen Belang. Denn wir würden daraus auf die analogen etwa beim Rot zu erwartenden Werte doch keinen Schlufs ziehen können. Jedenfalls bestätigen aber die Kontrollversuche mit homogenen Lichtern, dafs es ungemein gewagt und mifslich ist, aus jenen Einstellungen eines reinen Rot auf die Gröfse der Makula-Färbungen zu schliefsen. Nach meinen oben mitgeteilten Erfahrungen mufs man schon lange suchen, bis man zwei Personen findet, von denen die eine die dreifache Blaumenge erfordert wie die andere. Dafs der hohe Verhältniswert 1:6 in Herings Beobachtungen ganz auf Rechnung der Makula-Färbungen kommen sollte, ist mir hiernach sehr zweifelhaft, wenn ich es auch natürlich nicht mit Entschiedenheit bestreiten kann.

Unberechtigt erscheint es endlich auch, wenn H. zur Illustration der gleichen Verhältnisse die oben erwähnten Beobachtungen von Rayleigh und Donders mit einem einfachen „Es gehört endlich hierher“ etc. (S. 41) anführt. Denn diese Autoren (es war oben schon davon die Rede), haben die Eigentümlichkeit einzelner Personen, in den Rot-Grünmischungen (zur Erzielung einer Gleichung mit homogenem Gelb) sehr viel Grün zu brauchen, keineswegs auf Verhältnisse der Makula-

Färbung bezogen; und es lagen auch in den Beobachtungen sehr gewichtige Gründe vor, welche gegen diese Auffassung sprachen. Hering zieht daher hier zur Bewertung der Makula-Absorptionen Fälle heran, von denen zum mindesten nicht feststand, ob sie resp. die Eigentümlichkeiten ihres Sehens mit diesen Verhältnissen irgend etwas zu thun haben, und von denen daher sehr bezweifelt werden konnte, ob sie „hierher gehören.“

Der wesentliche Grund indessen für Herings unzutreffende Auffassung der Farbenblindheit lag wohl nicht in dieser Überschätzung der innerhalb der Farbentüchtigen vorkommenden Unterschiede; wir müssen ihn vielmehr, soweit wir wenigstens aus den von Hering mitgeteilten Beobachtungen schliefsen dürfen, vor allem in seiner sehr unvollständigen Untersuchung der Farbenblinden selbst finden. Betrachten wir nämlich die Gründe, die H. für seine Anschauung von dem Verhältnis der beiden Farbenblindheiten geltend macht (a. a. O. S. 24 f. des S.-A.), so findet man, dafs dieselben sich fast ausschliefslich um die Thatsache drehen, dafs, um aus Rot und Blau ein farblos erscheinendes Gemisch herzustellen, der „Rotblinde“ weniger Blau erfordert als der Grünblinde. Diese Thatsache war lange bekannt. Der Hinweis darauf, dafs sie vielleicht aus den auch innerhalb der Farbentüchtigen zu konstatierenden Differenzen sich erklären lasse, war sicher berechtigt; indessen blieb doch eine solche Erklärung, da es unmöglich war, auf andere Weise die Verschiedenheiten der Tingierung festzustellen, rein hypothetisch. Der faktische Nachweis, dafs der Rotblinde hier durch Vorsetzung einer oder einiger Makulae in einen Grünblinden verwandelt werden konnte, lehrte natürlich auch nichts Neues; denn das ist ja ganz selbstverständlich, dafs, wenn der eine einer geringeren Blaumenge bedarf, die Mischung des anderen durch irgend ein blauabsorbierendes Medium für ihn richtig gemacht werden kann. Unter diesen Umständen wäre nun doch wohl vor allem geboten gewesen, an einer möglichst vollständigen Reihe von Verwechselungsgleichungen zu prüfen, ob die Unterschiede der beiden Farbenblinden sich durchweg auf die ungleichen Makulafärbungen zurückführen lassen. Wie zu diesem Zwecke verfahren werden konnte, und wie die betr. Versuche zu beurteilen sind, ist oben auseinandergesetzt. Hätte Hering die Verhältnisse in ähnlich systematischer Weise durchuntersucht, wie es z. B. König später

gethan hat, so wäre er wohl ohne Zweifel zu dem gleichen Ergebnis gekommen, wie damals König und jetzt ich, nämlich einer typischen und durch Unterschiede der Makulafärbung nicht zu erklärenden Differenz der beiden Dichromaten-Arten. Hätte er auch nur eine einzige Verwechselungsgleichung zwischen homogenem Rot und Gelb vom Rot- und Grünblinden vergleichend prüfen lassen, so hätte ihm nicht entgehen können, daſs hier seine Annahmen den Thatsachen in keiner Weise gerecht werden. Über wirkliche Verwechselungsgleichungen findet sich aber bei H. nur die Angabe, daſs bei der Gleichung zwischen einem farblos erscheinenden homogenen Licht und einer Blau-Rot-Mischung, die ein durch eine stark tingierte Makula hindurchblickender Rotblinder herstellte, das Resultat „ungefähr dasselbe war, welches H. erfahrungsgemäſs von einem Grünblinden erhalten hätte, wenn er für ihn eine Gleichung zwischen demselben spektralen Grün und einer Mischung von spektralem Rot und Violett hergestellt hätte". Selbst in Bezug auf diese eine Art von Verwechselungsgleichungen fehlt es also an einem einigermaſsen ausgedehnten zahlenmäſsigen Material, welches zu einem Urteil darüber berechtigt hätte, ob quantitativ die beim Farbentüchtigen zu findenden Differenzen dem Unterschiede der beiden Arten der Farbenblindheit gleichkommen.[1] Verwechselungsgleichungen zwischen langwelligeren Lichtern (Grün, Gelbgrün, Gelb, Orange) und Mischungen aus Rot und Blau resp. reinem Rot, sind überhaupt nicht behandelt.

Man wird hiernach zugeben müssen, daſs es eine, gelinde gesagt, überaus gewagte Verallgemeinerung war, wenn H. gleich danach fortfährt: „So läſst sich denn, soweit es sich nur um

---

[1] Gegenwärtig kann man sagen, daſs bei den Gleichungen dieser Art der Unterschied zweier Farbenblinden gelegentlich so groſs wird, daſs schon aus diesem Grunde die Heringsche Erklärung unangängig wird. Er wird natürlich am gröſsten, wenn zu der Typus-Differenz noch ein Unterschied der Makula-Tingierung im gleichen Sinne wirksam hinzutritt. Vergleichen wir z. B. die Mischungen aus Rot (670,8) und Blau, die Herr Nagel und Herr Marx einstellen würden, um eine Gleichung mit homogenem Licht 496 $\mu\mu$ zu erhalten, so finden wir den Quotienten $\frac{R}{Bl}$ bei Marx mehr als 20fach gröſser. Wir können behaupten, daſs die Einflüsse der Makula-Tingierung innerhalb der Farbentüchtigen auch nicht annähernd solche Beträge erreichen.

die Verwechselungsfarben handelt, ein Rotblinder jederzeit in einen „Grünblinden“ verwandeln, ebenso wie sich jeder blausichtige Farbentüchtige auf diese Weise in einen Gelbsichtigen verwandeln läſst. Es gilt daher ganz allgemein die Regel, daſs die Farbengleichungen, welche man für einen durch eine kräftig tingierte Makula blickenden „Rotblinden“ herstellen kann, analog denjenigen sind, welche man für „Grünblinde“ gemacht hat“. Daſs H. sich zu dieser unzulässigen Verallgemeinerung verführen lieſs, erscheint um so rätselhafter, wenn man bedenkt, daſs damals zahlreiche Thatsachen bereits bekannt waren, welche dieser Verallgemeinerung entgegenstanden, vornehmlich dadurch, daſs sie einen groſsen Unterschied auch bezüglich der Rot-Gelb-Gleichungen herausstellten. Sieht man von den ausgedehnten Untersuchungen Holmgrens ab, bei denen keine homogenen Lichter benutzt und die nicht numerisch fixiert sind, so lagen doch schon Mitteilungen von Lord Rayleigh vor, nach denen das Intensitätsverhältnis, in welchem *Li*-Rot und *Na*-Gelb einander gleich gesehen werden, bei den beiden Dichromatenarten ganz verschieden ist.[1] Das Gleiche zeigte an einem ziemlich groſsen Material die von Hering bereits mehrfach zitierte Arbeit von Donders, Beobachtungen, die ich oben schon angeführt habe. — Indessen habe ich nicht zu untersuchen, weshalb H. seine Beobachtungen auf diese Verhältnisse nicht erstreckt hat; und die Gründe, aus denen ihm die erwähnten Angaben anderer Autoren nicht richtig oder nicht zuverlässig erschienen sind (das muſs doch wohl der Fall gewesen sein), entziehen sich, da sie nicht mitgeteilt sind, der Beurteilung. Mir liegt nur daran, zu konstatieren, daſs, wenn H. die Thatsachen an der Hand seiner Theorie verständlich machen zu können glaubte, der Grund hierfür lediglich in der auſserordentlichen Spezialisierung seiner Untersuchungen zu finden ist. Wir werden uns mit dieser Antwort auf die oben gestellte Frage bescheiden dürfen und können andererseits betonen, daſs sich auch in Herings Beobachtungen Nichts findet, was etwa mit unseren Ergebnissen in thatsächlichem Widerspruch stände. —

In einigen wenig erheblichen Beziehungen ist dies Resultat zu ergänzen. Zunächst findet sich auch in Herings Beobach-

---

[1] *Nature.* Vol. XXV. S. 66. 1883.

tungen wenigstens ein Hinweis auf die scharfe Scheidung der beiden Dichromaten-Gruppen. „Unter den wenigen Rotblinden", sagt H., „die ich zur genaueren Untersuchung herbeiziehen konnte oder wollte, war keiner, dem ich die oben erwähnte genaue Mittelstellung zwischen starker Blau- und starker Gelbsichtigkeit hätte anweisen können. Vielmehr gruppierten sich die einen mit ihrer allerdings verschiedenen Blausichtigkeit um Dr. Singer, die anderen mit ihrer ebenfalls verschiedenen Gelbsichtigkeit um Professor Biedermann."

H. läfst es aus diesem Grunde dahingestellt, „ob der von Manchen angenommenen strengen Teilung der Rotgrünblinden in „Rot-" und „Grünblinde" eine gewisse Berechtigung insofern zukommt, als die höheren Grade von Blausichtigkeit oder Gelbsichtigkeit häufiger vorkommen, als die Mittelgrade."

Bedenkt man, dafs ein derartiges Verhalten der Pigmentierungen doch recht unwahrscheinlich ist, auch bei den Farbentüchtigen sich nichts Analoges konstatieren läfst, so wird man sagen dürfen, dafs doch auch in Herings Beobachtungen sich gewisse Schwierigkeiten für seine Theorie bemerklich machten. Allerdings sind diese nicht sehr entscheidender Natur, und so mag man es verständlich finden, dafs H. sich darüber ohne weitere Bemerkung hinwegsetzt.

Der einzige Punkt, in dem ich H.s thatsächliche Befunde mit meinen Erfahrungen in einem gewissen Widerspruch finde, betrifft die Lage des neutralen Punktes (der Trennungslinie) im Spektrum. Zwar kann ich darin Hering zustimmen, dafs die Lage desselben innerhalb gewisser Grenzen schwankt, und dafs, wenn man sie durch Vergleichung mit unzerlegtem weifsen Licht sucht, sowohl die wechselnde Beschaffenheit dieses letzteren wie die individuellen Verhältnisse der Makula-Pigmentierung von Einflufs auf das Ergebnis sind. Dagegen steht es mit meinen Erfahrungen nicht im Einklang, wenn Hering sagt (S. 33.): „Ich habe zahlreiche Bestimmungen des reinen Grün bei verschiedenen Farbentüchtigen und der Trennungslinie bei Farbenblinden gemacht, letzterenfalls selbstverständlich ohne weifses Vergleichungslicht, und gefunden, dafs das Spektralgebiet, innerhalb dessen die Lage des reinen Grün der Fardentüchtigen und die Lage der Trennungslinie der Rotgrünblinden sich bewegt, im wesentlichen dasselbe ist." Nach meinen Erfahrungen kann spektrales Grün von etwa 505 $\mu\mu$ ab sicher bläulich genannt

werden. Dagegen wird ein Licht von 500 vom Rotblinden stets mit Sicherheit als gelb bezeichnet. Ich lege auf diesen Widerspruch gegen Herings Anschauungen schon wegen der Subjektivität der hier eingehenden Beurteilungen kein entscheidendes Gewicht; immerhin ist mir (ebenso wie König) die Thatsache mit Herings Anschauungen stets schwer vereinbar erschienen. Es wäre nicht ohne Interesse, zu erfahren, ob Herings Farbenblinde wesentlich gröſsere Wellenlängen als neutral eingestellt haben, oder ob nach seinen Erfahrungen das reine Grün der Farbentüchtigen noch mehr gegen das brechbare Ende zu verlegen ist.

Aus dem Angeführten kann entnommen werden, daſs Herings Beobachtungen im Grunde nicht geeignet waren, die ältere Anschauung von dem Verhältnis der Farbenblindheiten zueinander und zum normalen Farbensinn zu entkräften. Ich halte es für eine Pflicht literarischer Gerechtigkeit, hinzuzufügen, daſs ich keineswegs für mich das Verdienst in Anspruch nehmen darf, zuerst vollgültige Beweise für dieselbe erbracht zu haben. In der That sind ja die entscheidenden Sätze, daſs nämlich die Verwechselungsgleichungen für beide Gruppen verschieden sind, und daſs die Gleichungen des Trichromaten von beiden anerkannt werden, schon vor Jahrzehnten aufgestellt und von zahlreichen Autoren bestätigt worden. Wir müssen gegenwärtig konstatieren, daſs die Aufstellung dieser Sätze nicht nur thatsächlich das Richtige traf, sondern auch nach dem vorliegenden Beobachtungsmaterial ganz berechtigt war. Die individuellen Schwankungen sind thatsächlich nicht von so groſser Bedeutung, daſs nicht die Erhärtung dieser Sätze selbst mit relativ einfachen Mitteln ganz gut gelänge. Im Grunde konnte daher, was wir jetzt behaupten, schon vor 30 Jahren als ziemlich wahrscheinlich gelten. Einen der wichtigsten Fortschritte stellten, wie ich auch jetzt noch behaupten muſs, die Untersuchungen von König und Dieterici dar, da hier zuerst die Farbensysteme in einer ganz systematischen Weise mit Benutzung spektraler Lichter untersucht wurden. Hier führte die zunächst unabhängig geleitete Untersuchung der Trichromaten und beider Dichromaten-Arten zu dem Ergebnis „daſs die Fundamentalfarben der Dichromaten mit je zweien des Farbentüchtigen identisch sind“, was sachlich dasselbe, wie die eben angeführten Sätze bedeutet, und es war damit für diese eine systematische und in zahlenmäſsiger Weise fixierte Bestätigung

gewonnen. Ich glaube, daſs hiernach ein ernstlicher Zweifel an der Richtigkeit derselben nicht berechtigt war. Weiteren Untersuchungen blieb vorbehalten: erstens die typische Bedeutung der gefundenen Verhältnisse an einem gröſseren Material zu erweisen; zweitens die Abweichungen aufzuklären, welche, wie König und seine Mitarbeiter bald danach fanden, bei stark herabgesetzter Beleuchtung auftreten, die Erscheinungen des „Dämmerungssehens", wie ich es genannt habe; drittens endlich diejenige Rolle, welche die Unterschiede der Makula-Tingierung wirklich spielen, an zwei Farbenblinden von gleichem Typus aber stark verschiedener Tingierung klar zu legen. Meine Untersuchungen haben die Lehre von den dichromatischen Systemen nur insofern gefördert, als sie an der Beibringung dieser Ergänzungen Anteil haben; in der Hauptsache aber haben sie nur Bekanntes und schon früher Bewiesenes bestätigen können.

VI.

Überlegen wir zusammenfassend und von einem etwas allgemeineren Standpunkte aus, was sich bezüglich der Farbensysteme ergeben hat, so finden wir Folgendes. W i r h a b e n d a s t r i c h r o m a t i s c h e S y s t e m, w e l c h e s i n d e n H e l l g l e i c h u n g e n d e r ü b e r w i e g e n d e n M e h r z a h l v o n F a r b e n t ü c h t i g e n d a r g e s t e l l t i s t, u n d z w e i t y p i s c h v e r s c h i e d e n e, a u s i h m a l s R e d u k t i o n s f o r m e n a b z u l e i t e n d e d i c h r o m a t i s c h e S y s t e m e, d u r c h d i e H e l l g l e i c h u n g e n d e r e i n e n u n d d e r a n d e r e n A r t d e r p a r t i e l l F a r b e n b l i n d e n r e p r ä s e n t i e r t; w i r h a b e n d a n e b e n u n d o h n e e i n e e r k e n n b a r e B e z i e h u n g z u j e n e n d a s m o n o c h r o m a t i s c h e d e r a n g e b o r e n e n t o t a l e n F a r b e n b l i n d h e i t, w e l c h e s i d e n t i s c h i s t m i t d e m j e n i g e n, w e l c h e s a u c h D i- u n d T r i c h r o m a t e n b e i m D ä m m e r u n g s s e h e n z e i g e n.

Die Sicherheit dieser Aufstellungen erscheint durch individuelle Differenzen physikalischen Ursprungs nur wenig gemindert, ja, wenn man die Präzision bedenkt, mit der sich in den Schwankungen der Mischungsgleichungen die durch direkte Beobachtung festgestellte Natur des Pigments wiederfindet, vielleicht eher noch vermehrt.

Wenden wir uns nunmehr zu der Frage, was aus diesem grofsen und schliefslich eine so einfache Darstellung gestattenden Thatsachen-Komplex in Bezug auf die Bildung unseres Gesichts-Apparates geschlossen werden kann. Ein Erstes ist hier jedenfalls sehr einfach und bedarf nur weniger Worte. Auch in der sich hier bietenden Gruppierung werden uns die Thatsachen wohl einigermafsen zwingend zu der Vorstellung führen, dafs es zwei unabhängige, durch keine erkennbare Beziehung einander gleichende Apparate giebt, nämlich erstens den in den Hellgleichungen des Trichromaten zur Geltung kommenden, durch dessen Reduktion wir uns die entsprechenden Apparate des Protanopen und des Deuteranopen gebildet denken können, und zweitens denjenigen, welcher beim „Dämmerungssehen" der Di- und Trichromaten funktioniert, und der beim total Farbenblinden allein vorhanden ist. Diese Vorstellung ist aber genau dieselbe, zu der wir auf Grund anderer Thatsachen ebenfalls gelangt waren, und die ihren Ausdruck in der Hypothese über die Funktion der Stäbchen gefunden hat. Man darf sagen, dafs das Auftreten des farbenempfindlichen Apparates in drei verschiedenen, untereinander deutlich zusammenhängenden Formen (normales trichromatisches, protanopisches und deuteranopisches Farbensystem), wobei der dem Dämmerungssehen dienende in allemal gleicher Weise nebenhergeht, die Unabhängigkeit jenes farbenempfindlichen Apparates in ebenso deutlicher Weise darthut, wie andererseits die totale Farbenblindheit die Isolierung des anderen darstellt. Einen Hinweis auf die anatomische Grundlage dieser Duplizität kann natürlich die Analyse der Farbensysteme für sich allein nicht liefern; dafs sie aber durch die Bestätigung ihrer allgemeinen Grundanschauung der Stäbchentheorie in erfreulicher Weise zur Stütze dient, das läfst sich wohl keinen Augenblick verkennen.

Eine weitere nicht unwichtige Stütze gewähren der Theorie die neueren Ermittelungen hauptsächlich durch die Feststellung, dafs die Gleichungen der total Farbenblinden nicht in erheblichem Mafse von Lichtstärke und Adaptation abhängen. In der That konnte man, so lange dies nicht feststand, ja wohl allenfalls daran denken, dafs die Änderungen, welche z. B. die Gleichungen des Grünblinden erfahren, wenn wir vom Dämmerungssehen zu hohen Lichtstärken und Helladaptation übergehen, auf irgend einer dabei stattfindenden Modifikation des

Sehapparates beruhen. Nachdem wir wissen, daſs für den total Farbenblinden, dessen Dämmerungssehen ganz das gleiche ist, nichts derartiges stattfindet, werden wir uns noch zwingender zu der früher schon bevorzugten Annahme gedrängt sehen, daſs bei den Hellgleichungen ein anderer Apparat, ein anderer Bestandteil des Sehorgans, ins Spiel kommt.

Die nächste Frage wird nun die sein, ob wir auch über die Bildung der farbenempfindlichen (sei es tri-, sei es dichromatischen) Apparate aus den obigen Thatsachen etwas folgern können. Nur ungern entschlieſse ich mich zu einer Erörterung dieser Frage; denn zur Entwickelung hierhergehöriger Vorstellungen oder gar zur Aufstellung einer Lehre, die sich den zahlreichen Theorien der Gesichtsempfindungen als eine neue anreiht, kann wohl kein Augenblick ungeeigneter sein, als der gegenwärtige. Einerseits liegt eine Anzahl physiologischer Probleme noch vor uns (schon die Aufstellung der Stäbchentheorie hat neue gestellt resp. alte wesentlich modifiziert), deren Behandlung und Lösung wir wohl von einer nicht fernen Zukunft erwarten dürfen.[1] Andererseits aber befinden wir uns in einem Stadium, in welchem sich unsere anatomischen Kenntnisse nicht nur vom Nervensystem überhaupt, sondern auch speziell von der Netzhaut so zu sagen täglich bereichern. Je mehr man hoffen darf, für die Physiologie der Gesichtsempfindungen hier greifbare Unterlagen zu finden und aus dem Stadium der ganz abstrakten Begriffe (Komponenten, Sehsubstanzen etc.) heraus zu kommen, um so weniger wird man zu Erörterungen Neigung fühlen, die jenen hoffnungsvolleren sich allmählich erschlieſsenden Weg doch noch nicht einschlagen können und sich noch auf dem älteren schwankenden Boden bewegen müssen. Gleichwohl möchte ich einige Bemerkungen darüber nicht unterdrücken, was denn aus den obigen Tatsachen geschlossen werden kann. Sie werden namentlich gegenüber der oft zu bemerkenden Neigung, zu viel zu folgern, am Platze sein.

Die Beziehung eines dichromatischen zu einem trichromatischen Farbensystem, welche wir dadurch bezeichneten, daſs wir jenes eine Reduktionsform von diesem nannten, läſst eine ganz einfache Deutung zu, wenn wir, wie es sowohl die Hering-

---

[1] Hierher rechne ich vor allem die Lehre von der Farbenblindheit der peripheren Netzhautpartien.

sche als auch die ältere Form der YOUNG-HELMHOLTZschen Theorie thaten, den Gesichtsapparat aus einer Anzahl einzelner Bestandteile zusammengesetzt denken und uns die Reduktion durch das Fehlen eines dieser Bestandteile erklären. In der That ist klar, dafs alsdann dem Dichromaten alle Lichter gleich erscheinen müssen, die es für den Trichromaten sind, überdies aber auch alle, die sich für den Trichromaten ausschliefslich bezüglich ihrer Wirkung auf jenen ihm (dem Dichromaten) abgehenden Bestandteil unterscheiden. Nach diesem Prinzip hat sowol die HELMHOLTZsche wie die HERINGsche Theorie die Beziehungen der Farbenblindheit zum normalen Farbensehen aufgefafst. Die fortgesetzten Untersuchungen haben gelehrt, und wir können allmählich wohl diese Thatsache als einen gesicherten Besitz der physiologischen Optik in Anspruch nehmen, dafs die Farbenblindheiten wirklich Reduktionsformen des trichromatischen Systems sind, aber Rotblindheit und Grünblindheit zwei verschiedene, und es folgt hieraus direkt, dafs, wenn wir an dem Grundgedanken einer den ganzen Gesichtsapparat umfassenden Komponenten-Gliederung festhalten, zwei dieser Bestandteile in Bezug auf ihre Erregbarkeit durch Licht annähernd die ihnen von HELMHOLTZ zugeschriebene Beschaffenheit haben müssen.[1] Wenn nun Jemand geneigt sein könnte, hierin ganz ohne weiteres einen Beweis für die Richtigkeit der Y.-H.schen Theorie zu erblicken, so mufs diese Folgerung doch in mehreren Beziehungen noch weiter geprüft und, wie sich zeigen wird, thatsächlich eingeschränkt werden.

Erstlich verbietet es sich aus zahlreichen und hinlänglich bekannten Gründen, die erwähnte Gliederung als eine den ganzen Gesichtsapparat umfassende vorzustellen. Es wäre überflüssig, oft und von verschiedenen Seiten Beigebrachtes hier zu wiederholen; es mag daher genügen, hier lediglich zu konstatieren, dafs auch nach meiner Überzeugung einesteils die wirkliche Beschaffenheit unserer Empfindungen es unmöglich macht, diese als Kombination einer roten, grünen und blauen Elementar-Empfindung aufzufassen, andererseits aber auch die bei vielen Detailerscheinungen sich ergebende Unmöglichkeit, sie an der Hand

---

[1] Eine mathematisch formulierte Erörterung darüber, wie weit die Beschaffenheit der betr. Komponenten als festgestellt gelten darf, lasse ich unten nachfolgen.

der HELMHOLTZschen Theorie zu erklären, noch irgend welche andre, den HELMHOLTZschen Komponenten nicht entsprechende Bildungen des Gesichtsapparates wahrscheinlich macht. Aus diesem Grunde mufs denn betont werden, dafs es für die Erklärung der Farbenblindheiten als Reduktionsformen ausreicht, wenn man den HELMHOLTZschen Komponenten die Bedeutung einer peripheren Gliederung zuschreibt. Denn wenn der Gesichtsapparat in einem peripheren Teil diese Einrichtungen darbietet, so versteht es sich von selbst, dafs zwei Lichtgemische, die auf jede jener drei Komponenten übereinstimmend wirken, auch die gleiche Empfindung geben. Eben hierin liegt es ja begründet, dafs mit einer bestimmten Beschaffenheit jener Komponenten ein bestimmtes „Farbensystem“ gegeben ist, d. h. systematisch angegeben werden kann, welche Lichtgemische gleich aussehen. Nicht minder notwendig mufs bei einem Ausfall einer Komponente eine Reduktionsform des ursprünglichen Farbensystems entstehen; denn auch hier gilt es, dafs zwei im ursprünglichen Farbensystem gleiche Mischungen gleich bleiben müssen, aufserdem aber auch alle diejenigen gleich werden, die sich im ursprünglichen System nur hinsichtlich ihrer Wirkung auf den einen nunmehr mangelnden Bestandteil unterschieden. Wir sind hierbei zunächst garnicht veranlafst, über die Natur der weiter zentralwärts sich abspielenden Prozesse uns irgend welche Vorstellungen zu bilden; mögen sie sein, welcher Art sie wollen: jene Folgerungen werden immer zutreffen müssen.

Erwägt man, mit welcher Präzision sich die Erscheinungen der Farbenblindheit an der Hand dieser Theorie verstehen lassen, so wird man die Behauptung gerechtfertigt finden, dafs wir es hier mit einer der sichersten theoretischen Errungenschaften in der Lehre von den Gesichtsempfindungen zu thun haben. Wie hoch man ihren Wert veranschlagen will, ist natürlich eine Sache subjektiven Ermessens. Mir erscheint er grofs, wenn ich bedenke, wie einfach und durchsichtig die Lehre von den verschiedenen Farbensystemen und ihrem Zusammenhang sich gestaltet. Selbstverständlich aber ist er beschränkt, sofern wir uns mit dem abstrakten Begriff der „Komponente“ begnügen, ohne ihm ein greifbares Substrat zu geben, und nicht minder, sofern der ganze gewonnene Aufschlufs eben nur einen peripheren Teil des Gesichtsapparates zu umfassen scheint. Dafs wir in der ersteren Beziehung durch

naheliegende Hypothesen (Substantiierung der drei Komponenten in drei lichtempfindlichen Stoffen u. dergl.) weiter gelangen können, ist so bekannt, daſs der allgemeine Hinweis darauf genügt. Dagegen seien hier noch einige Bemerkungen über die erwähnte Unvollständigkeit der Theorie angefügt.

Eine bestimmte Vorstellung von der Natur der zentralen den Gesichtsempfindungen zu Grunde liegenden Vorgänge erscheint unter anderem deswegen besonders erwünscht, weil sie uns in die Lage versetzen würde, zu beurteilen, was der Farbenblinde eigentlich sieht, uns von seinen Empfindungen nach Maſsgabe der unsrigen eine deutliche Vorstellung zu bilden. Was sind wir in dieser Beziehung gegenwärtig zu sagen berechtigt? Meines Erachtens ist das, was wir über die Empfindungen der Farbenblinden im Vergleich zu den unsrigen sagen können, z. Z. wenig. Am ehesten kann als wahrscheinlich gelten, daſs bei den als farblos bezeichneten Empfindungen die Natur der physiologischen Prozesse und der Empfindungen selbst beim Farbenblinden und beim Farbentüchtigen übereinstimmen. Hierfür kann erstens, wie dies ja seit lange geschehen, der von Hippel beobachtete Fall einseitiger Farbenblindheit angeführt werden, bei welchem (leider ein Unikum) die Empfindungen des farbenblinden Auges direkt mit denen des farbentüchtigen verglichen werden konnten, und in dem sich zeigte, daſs das gemischte weiſse Tageslicht auch von dem farbenblinden Auge farblos gesehen wurde.

Ferner darf man darauf hinweisen, daſs ein Apparat, nämlich die Stäbchen, sich bei allen Personen in übereinstimmender Bildung findet; nimmt man an, daſs seine Erregung überall die gleiche Empfindung hervorruft, so würde, da diese durchweg als farblos oder nahezu farblos bezeichnet wird, auch von dieser Seite wahrscheinlich gemacht sein, daſs diese Bezeichnung in Wirklichkeit durchweg gleichen Empfindungen und zentralen Vorgängen entspricht. Erachten wir dies einmal für festgestellt, so würde wohl auch weiter als wahrscheinlich gelten können, daſs die Empfindungen zwei farbige Bestimmungen zulassen, die mit zweien in unserem Farbensystem komplementären etwa zusammentreffen.

Auch für diese Vorstellung bietet sich noch eine relativ einfache Erklärung ohne die Einführung von Hypothesen über die Natur der zentralen Vorgänge. Man kann sich denken, daſs

beim Farbenblinden gewissermaßen die eine Komponente doppelt vorhanden ist, und daß die beiderlei zentralen Folgen, die beim Farbentüchtigen sich an die Thätigkeit der Rot- und der Grünkomponente knüpfen, hier durch die Thätigkeit zweier übereinstimmender Gebilde bewirkt werden, welche beide, sei es der Rot-Komponente, sei es der Grün-Komponente des Farbentüchtigen gleich sind. Wir könnten uns, um die Sache durch eine Fiktion etwas greifbarer zu gestalten, z. B. drei Zapfenarten denken, welche mit drei verschiedenen lichtempfindlichen Körpern A, B, C angefüllt sind; fehlte dem Farbenblinden die Substanz A, und wären nun auch die normaler Weise A-haltigen Zapfen gleichfalls mit B angefüllt,[1] so würde das Ergebnis wohl etwa dasjenige werden müssen, welches realisiert zu sein scheint.

Ich bin indessen weit entfernt, diese Annahme, die auch ihr Bedenkliches hat, mit Entschiedenheit zu vertreten. Lassen wir sie fallen, so wird die Möglichkeit, über das Sehen des Farbenblinden in der Sprache unserer Empfindungen etwas auszusagen und die modifizierte Beschaffenheit seines Empfindungssystems zu deuten, nur noch auf dem Boden irgend einer Hypothese über die Natur der zentralen (nervösen und psychophysischen) Vorgänge gegeben sein. Hiermit sind wir dann aber bei den Fragen angelangt, deren Behandlung mir, wie vorhin gesagt, wenig zeitgemäß erscheint, und deren weitere Erörterung also hier unterbleiben soll. Die Lücke, die wir solcherart unausgefüllt lassen, suche ich nicht zu verbergen; verzichten wir vorläufig auf eine Hypothese über die Natur der zentralen Vorgänge, so entschlagen wir uns natürlich auch der Vermutungen darüber, in welcher Weise die Zustände der peripheren Komponenten jene zentralen Vorgänge bestimmen, welche Reduktion dieser der peripheren Reduktion entspricht, und wie es etwa kommt, daß der auf zwei periphere Komponenten beschränkte Farbenblinde neben farbloser Helligkeit nur Gelb und Blau sieht. Zu betonen wäre hierbei nur, daß eine derartige Vorstellung, so unvollständig man sie finden mag, z. Z. je-

---

[1] Es käme dies so ziemlich auf die von König bevorzugte Anschauung hinaus, daß die Grün-Komponente die Beschaffenheit einer Rot-Komponente angenommen habe, oder umgekehrt. Wir hätten aber hier in dem Fehlen eines peripheren Bestandteiles den angebbaren Grund für diese Modifikationen.

denfalls auf keine positiven Schwierigkeiten stöſst; denn der Möglichkeiten einer solchen Aneinanderschlieſsung verschiedenartiger und verschieden gegliederter Vorgänge, wie sie hier gefordert wird, sind jedenfalls sehr viele; eine fruchtbare Phantasie wird keine Schwierigkeit haben, so manche aufzufinden. Und auf der anderen Seite: wer glaubt denn ernsthaft, daſs wir die Einrichtungen so verschiedenartiger Gebilde, wie sie der Gesichtsapparat doch thatsächlich hintereinander geschaltet aufweist (z. B. schon der Sehzellen und der Optikus-Fasern), durch eine und dieselbe Formel zutreffend darstellen können?

Das Ergebnis dieser Überlegungen wäre also, daſs die Verhältnisse des Sehens der Farbenblinden, wie sie sich in den Verwechselungsgleichungen dokumentieren, in der That den aus der Young-Helmholtzschen Lehre gezogenen Folgerungen entsprechen, daſs sie insofern auch die reale Bedeutung dieser Lehre schlagend darthun. Bei dem eingeschränkten Sinne aber, in dem die Begriffe der Helmholtzschen Theorie jedenfalls genommen werden müssen, bleibt die Frage, was die Farbenblinden sehen, hierbei ganz unberührt, und es ist z. B. auch denkbar, daſs die Heringsche Annahme, wonach sie Gelb und Blau zu empfinden vermögen, richtig ist. — Daſs die Theorie einen groſsen Erscheinungs-Komplex in einer frappanten Weise zu erklären vermag, ohne sich auf den unsicheren Boden jener Frage (was der Farbenblinde sieht) überhaupt zu begeben, das ist mir stets als ein Vorzug erschienen. Aber ich verhehle mir nicht, daſs gerade dieser Umstand und der damit verknüpfte Mangel an Anschaulichkeit dem Verständnis und der Rezipierung der Theorie hindernd im Wege standen und wohl noch lange stehen werden. In der That gehört sehr viel mehr Überlegung und Abstraktion dazu, sich deutlich zu machen, welche Erfolge der Ausfall einer derartigen peripheren Komponente haben muſs, als um, direkt von unseren Empfindungen ausgehend, sich gewisse in diesen charakterisierte Qualitäten hinweg zu denken. Nichts kann glatter und einfacher sein, als die Erscheinungen der Farbenblindheit aus dem Fehlen des „Rotgrünsinnes" zu deduzieren; schade nur, daſs die Thatsachen dieser einfachen Auffassung nicht entsprechen. Zuzugeben ist aber, daſs auf dem Standpunkt dieser theoretischen Auffassung die Ausdrücke Rotblind und Grünblind noch weniger glücklich gewählt erscheinen, als sie schon von Anfang an waren. Denn mit Hartnäckigkeit

versteht der minder Kundige (vom Laien ganz zu schweigen) hierunter das Unvermögen, Rot resp. Grün zu empfinden, oder vielleicht das Unvermögen, rotes oder grünes Licht überhaupt zu sehen, in beiden Fällen durch den Wortsinn irre geleitet und in Widerspruch mit der Meinung derjenigen, die die Bezeichnungen einführten. Gemeint ist der Mangel eines dem Sehorgan zugeschriebenen Bestandteiles, dessen Natur und Funktionsweise durch die Bezeichnung als Rot-Komponente oder Grün-Komponente durchaus nicht unmittelbar verständlich angegeben ist und überhaupt auch garnicht mit einem Wort erschöpfend angegeben werden kann, was denn natürlich in gleicher Weise auch von der durch sein Fehlen bedingten Anomalie des Sehens gilt. Man kann sogar zugeben, dafs die Heringsche Bezeichnung Rotgrünblindheit, wenngleich sie vielen Bedenken unterliegt, doch das Verhalten beider Typen in einer sehr anschaulichen und vermutlich annähernd richtigen Weise angiebt und insofern gewisse Vorzüge besitzt. Der wissenschaftliche Sprachgebrauch wird jedoch Ausdrücke nötig haben, die den Unterschied der beiden Typen kürzer als etwa in der schwerfälligen Wendung Dichromaten (oder Rotgrünblinde) erster und zweiter Form bezeichnen, und es dürfte wohl auch gerechtfertigt sein, hier die theoretisch erfassten Gründe der ganzen Erscheinung zur Geltung zu bringen. Von diesem Gesichtspunkt aus habe ich die obigen Bezeichnungen Protanopen und Deuteranopen, in Vorschlag gebracht.

Die bisherigen theoretischen Erörterungen haben durchgängig nur mit dem Gedanken operiert, dafs irgend ein Bestandteil des normalen Gesichtsapparates bei einem anderen in Fortfall gekommen sein, fehlen könnte. Es wird daneben der Fall zu berücksichtigen sein, dafs etwa der eine Bestandteil insbesondere durch Abänderung der für ihn geltenden Kurve der Reizwerte modifiziert wäre. Selbstverständlich ist ganz im allgemeinen auch die Möglichkeit einer derartigen Modifikation eines Bestandteiles im Auge zu behalten.

Was nun den Anlafs betrifft, der für eine solche Annahme etwa vorliegen kann, und ihre theoretische Würdigung, so müssen meines Erachtens zwei Hauptfälle unterschieden werden. Haben wir zwei trichromatische Systeme, die sich von einander unterscheiden, derart, dafs die Mischungsgleichungen des einen für das andere nicht durchweg gültig sind, so können wir

dieser Thatsache stets durch die Annahme gerecht werden, dafs eine oder mehrere Komponenten mit denen des anderen Systems nicht übereinstimmen. Dies versteht sich ganz von selbst. Nicht minder klar scheint mir aber auch, dafs eine solche Beziehung von sehr geringem theoretischem Belang ist, wenn sich keinerlei Aufschlufs darüber geben läfst, worin etwa jene Modifikation der Komponenten bestehen oder worauf sie beruhen mag. Im Grunde liegen dann eben zwei trichromatische Systeme ohne ersichtlichen Zusammenhang vor; ihr gegenseitiges Verhältnis entzieht sich der Erklärung.

Wesentlich anders liegen die Dinge, wenn es sich um ein dichromatisches System handelt, welches, wie wir es ausdrückten, eine Reduktionsform eines trichromatischen darstellt. Wie eine vollständigere Überlegung lehrt, ist auch hier das Fehlen eines Bestandteiles zwar wohl die einfachste, aber nicht die allgemeinste Annahme. Wenn wir mit φ, χ und ψ die Funktionen der Wellenlängen bezeichnen, welche die drei Bestandteile eines trichromatischen Systems charakterisieren, so wird eine Reduktionsform desselben jedes darstellen, dessen Bestandteile durch zwei Funktionen

$$\alpha\varphi + \beta\chi + \gamma\varphi \text{ und}$$
$$\alpha'\varphi + \beta'\chi + \gamma'\varphi$$

in gleichem Sinne charakterisiert sind. Es ist nur ein spezieller Fall, den wir bisher in Betracht zogen, dafs von diesen Koeffizienten zwei verschwinden und somit etwa eine dieser Funktionen mit φ, eine andere mit ψ zusammentrifft.

Die Bedingung für das Bestehen eben jener Beziehung, derzufolge wir das eine System eine Reduktionsform des anderen nennen, haben wir hiermit noch allgemeiner formuliert als Fick, der jüngst darauf hingewiesen hat,[1] dafs dieselbe auch dann bestehen mufs, wenn die beiden Bestandteile des trichromatischen Systems gewissermafsen miteinander verschmelzen, so dafs die charakterisierende Erregbarkeitskurve des neuen Bestandteils durch $\frac{\varphi + \chi}{2}$, das arithmetische Mittel aus den Kurven jener beiden Bestandteile dargestellt würde. Aus mehreren Gründen scheint mir aber doch die ältere Vorstellung den Vor-

---

[1] *Pflügers Arch.* Bd. LXIV. S. 313.

zug vor der hier vorgeschlagenen zu besitzen. Erstlich ist das Fehlen eines gewissen Bestandteiles doch wohl in theoretischer Beziehung das einfachste und verständlichste; gerade aus diesem Grunde ist es berechtigt, wenn man in der Bildung von Reduktionsformen eine überzeugende Bestätigung der Komponenten-Theorien von jeher erblickt hat. Von der Bildung eines neuen Bestandteils durch eine Verschmelzung von zweien, derart, dafs seine Beschaffenheit das arithmetische Mittel zwischen der Beschaffenheit jener darstellte, wüfste ich mir kein anschauliches Bild zu machen. Abgesehen hiervon indessen steht einem derartigen Versuch eine Beziehung der dichromatischen Systeme gegenüber, die, wie es scheint, von Fick nicht bemerkt worden ist, die nämlich, dafs ihre Blau-Kurven annähernd, (unter Berücksichtigung der Makula-Absorptionen wahrscheinlich genau) übereinstimmen. Hiernach ist es unmöglich, mit Fick anzunehmen, dafs, wenn φ, χ und ψ die charakterisierenden Funktionen für die normalen Komponenten sind, die des einen Dichromaten $\frac{\varphi + \chi}{2}$ und ψ die des anderen $\frac{\varphi + \psi}{2}$ und χ sein sollten. Halten wir daran fest, dafs das eine Mal ein und das andere Mal ein anderes arithmetisches Mittel vorliegen soll, so könnte zwar die andere (beiden Dichromaten gemeinsame) Komponente durch eine lineare Funktion aller drei den normalen Bestandteilen zukommenden Funktionen (also durch eine Funktion von der Form $\alpha\varphi + \beta\chi + \gamma\psi$) charakterisiert sein, aber es könnte nicht einfach in beiden Fällen die an der Verschmelzung nicht partizipierende dritte sein. Bei dieser Ausgestaltung sind aber die Annahmen doch wohl zu künstlich, um vorläufig zu einer weiteren Verfolgung einzuladen.

Schliefsen wir hier endlich noch eine kurze Erörterung darüber an, wie weit wir, bei unserer obigen Annahme stehen bleibend, die Natur der betreffenden Komponenten als durch die Ermittelungen festgestellt erachten dürfen. Hier ist nun zunächst daran zu erinnern, dafs die quantitative Ermittelung schon einer Verwechselungsgleichung uns gestattet, im Sinne der älteren Helmholtzschen Darstellung den Ort der betreffenden Komponente in der Farbentafel anzugeben. Ähnlich bezeichnete auch Maxwell z. B. die fehlende Komponente als 22,6 *R* + 4,3 *Bl* — 7,7 *Gr* und so könnten auch wir sie z. B. in Einheiten des Gasdispersionsspektrums durch den Wert 1,91 Rot (670,8) + 0,5

Blau (460,7) — 1,0 Blaugrün (496) entsprechend der Gleichung 1,91 Rot + 0,5 Blau = 1,0 Blaugrün für den Protanopen *M* ausdrücken; ähnlich durch den Wert 1,0 Blaugrün — 0,77 Blau — 0,11 Rot für den Deuteranopen NAGEL. Zu beachten ist aber, dafs diese Fixierung in der (empirisch konstruierten) Farbentafel nicht identisch ist mit der Feststellung der neuerdings meist zur Charakterisierung der Komponenten benutzten Kurven, welche die Stärke der Wirkung des Lichts auf die betreffende Komponente als Funktion der Wellenlänge angeben. Es mag daher hier noch darüber Einiges hinzugefügt werden, wieweit in diesem letzteren Sinne die Beschaffenheit der Komponenten als festgestellt gelten kann. Nennen wir die mehrerwähnten Funktionen der Wellenlänge für den Grünblinden φ und ψ, für den Rotblinden χ und ψ, so könnten, sofern wir jeden derselben ganz für sich betrachten, an Stelle von φ und ψ auch zwei beliebige Funktionen von der Form $\alpha\varphi + \beta\psi$ und $\alpha'\varphi + \beta'\psi$ gewählt werden, ebenso für den Grünblinden statt χ und ψ zwei lineare Funktionen von χ und ψ.

Wenn also *F* und *H* resp. *G* und *H* die charakterisierenden Funktionen der realiter vorhandenen Komponenten wären, so könnte man zunächst nur sagen, dafs diese Werte irgend welche lineare Funktionen jener anderen (*F* und *H* von φ und ψ, *G* und *H* von χ und ψ) sein müssen. Diese Unbestimmtheit reduziert sich indessen sogleich, wenn wir beachten, dafs wir nach der Theorie ein in beiden Fällen übereinstimmendes *H* (die beiden Farbenblinden gemeinsame Komponente) erwarten müssen, und dafs wir ein in beiden Fällen übereinstimmendes φ (gleiche Blau-Kurven) wenigstens mit grofser Annäherung gefunden haben. Es wird daraus zu schliefsen sein, dafs die gefundenen Blau-Kurven die die Blau-Komponente charakterisierende Funktion mit grofser Annäherung darstellen, und diese könnte also, wenn nicht mit absoluter Genauigkeit, doch mit Annäherung als fixiert gelten. Dagegen blieben für die charakterisierenden Funktionen der „Rot- und Grün-Komponente“ (*F* und *G*) zunächst die Möglichkeit bestehen, dafs sie nicht mit φ resp. χ, den gefundenen *W*-Kurven, identisch wären, sondern gegeben durch Werte von der Form $\varphi + \varepsilon\psi$ und $\chi + \varepsilon'\psi$. Interpretiert würde diese mathematische Formulierung besagen, dafs das in den Versuchen angewandte blaue

Licht möglicherweise noch geringe Erregungen auf die Rot- resp. Grün-Komponente ausübt. Die Kurven G und F (die charakterisierenden der realen Komponenten) würden darnach von 530 $\mu\mu$ ab etwas höher verlaufen, als die gefundenen Kurven φ und χ. Dafs dies der Fall ist, können wir schon aus dem Grunde als wahrscheinlich bezeichnen, weil für den Grünblinden die Sättigung der Farbe jedenfalls bis 436 $\mu\mu$ zunimmt, also bei 460 sicher noch eine merkliche Miterregung der Rot-Komponente stattfindet. Für rotblinde Personen habe ich besondere Versuche hierüber nicht angestellt; es dürfte aber für sie um so mehr der Fall sein, da ja durchgängig in der brechbareren Spektralhälfte die W-Kurve des Grünblinden schneller als die des Rotblinden absinkt. Eine ganz genaue Feststellung der charakterisierenden Funktionen für die Rot- und Grün-Komponente ist also z. Z. noch nicht möglich. Immerhin wird man sagen dürfen, dafs sie erstlich bis etwa 536 $\mu\mu$ als festgestellt gelten können, da die Funktion ψ bis dahin merklich gleich Null ist, und dafs auch im weiteren Verlauf erst die letzten Endstrecken in erheblichem Mafse unsicher werden.[1] Bleiben daher auch einige Detailfragen noch offen, so können wir doch in der Hauptsache die Komponenten als festgestellt, d. h. die für jede geltende Abhängigkeit des Reizwertes von der Wellenlänge als ermittelt betrachten.

Wir sind, wie ich glaube, berechtigt, in den mitgeteilten Thatsachen eine äufserst schlagende Bestätigung dafür zu finden, dafs die von der Helmholtzschen Theorie angenommenen Be-

---

[1] Die in mancher Hinsicht wohl am meisten interessierende Frage, ob bei kurzwelligem Lichte wieder eine relativ stärkere Wirkung auf die Rot-Komponente stattfindet, kann man am ehesten durch Beobachtungen am Grünblinden zu entscheiden hoffen, der in diesem Falle bei abnehmenden Wellenlängen wieder weniger gesättigtes Blau würde sehen müssen. Die Beobachtungen mit Gaslicht sind jedoch hierfür nicht zu verwenden, da dasselbe im Violett zu lichtschwach ist, um noch irgend etwas mit Sicherheit feststellen zu können. Einige Beobachtungen, die ich mit Dr. Nagel gelegentlich an meinem älteren Apparate mit Tageslicht angestellt habe, führten zu keiner sicheren Entscheidung; allerdings schienen die sehr lichtschwachen äufsersten Teile des Spektrums (um 400 $\mu\mu$) an Sättigung ein wenig zurück zu bleiben; doch bleibt zu berücksichtigen, dafs es sich hier schon um Einmischung von Fluoreszenz gehandelt haben kann. Bis 436 $\mu\mu$ herab nimmt, wie schon gesagt, die Sättigung jedenfalls zu.

standteile des Sehorgans eine reale Bedeutung besitzen. Gleichwohl wird natürlich der vorsichtige Forscher über die zunächst hypothetische Natur dieser Komponenten nicht im Zweifel bleiben und nicht nur von der Zukunft die Feststellung erhoffen, was sie eigentlich sind, sondern auch mit der Möglichkeit rechnen, daſs sie durch irgend eine im Effekt ähnliche Einrichtung vorgetäuscht seien. Um so mehr ist es angezeigt, die rein thatsächlichen Feststellungen zu betonen, zu denen wir gelangt sind. Ohne jeden theoretischen Ausblick dürfen wir behaupten, daſs, was Hering über den Unterschied der beiden Gruppen von Farbenblinden gelehrt hat, mit zahlreichen älteren Beobachtungen schon schwer vereinbar, mit den Befunden von Donders, König und mir absolut im Widerspruch, durch seine eigenen Beobachtungen nicht erwiesen, daſs es thatsächlich unrichtig ist. Der Unterschied des Rot- und des Grünblinden besteht nicht in einer relativen Gelb- und Blausichtigkeit von der Art, wie sie beim Normalsehenden auch gefunden wird; er besteht vielmehr in einer anderen Verteilung der Reizwerte, welche bereits im langwelligsten Teile des Spektrums völlig scharf charakterisiert ist. Hat die einseitige Betrachtung vom Standpunkt einer Theorie aus geraume Zeit und in weiten Kreisen zu einer Verkennung dieser Thatsachen geführt, so ist es um so dringender geboten, ihnen wieder die Anerkennung und Beachtung zu vindizieren, die sie verdienen.

VII.

Was die Technik und die rechnerische Behandlung der obigen Versuche angeht, so kann in der Hauptsache auf das verwiesen werden, was im Schluſsabschnitt der Arbeit von Nagel und mir angegeben worden ist.[1] Die benutzten Spaltweiten waren bei dem anderen Grünblinden (St.) die nämlichen wie in den Versuchen von Dr. Nagel und sind aus dem letzten Stabe der Tabelle auf Seite 8 jener Arbeit ersichtlich. Für den Rotblinden wurde als brechbarer Bestandteil nicht Gelbrot 645 $\mu\mu$ benutzt, weil dieses den Rotblinden zu schwach sichtbar ist, sondern *Na*-Gelb. Da zwischen diesem und den noch weniger brechbaren Lichtern sich genaue Gleichungen erzielen lassen, so hatte die Wahl dieses Lichtes kein Bedenken. Für

[1] *Zeitschr. f. Psychol.* XII. S. 19 f.

die Bestimmung der W-Werte bei 670,8, 656 und 642 wurde, um nicht zu geringe Spaltweiten benutzen zu müssen, das *Na*-Licht vermittels eines blauen Glases abgeschwächt, dessen Absorption für dieses Licht in einer Reihe besonderer Versuche sorgfältig ermittelt worden war. Im übrigen kann die Reinheit der in den Mischungsversuchen der Rotblinden benutzten Lichter aus der nachfolgenden Zusammenstellung ersehen werden.

Homogenes Licht.	0 1 2	3—12	13,5	15 16,5	18 19,5 21	23 24,7
Spaltweiten	Sp. II. = 40 mit blauem Glase.	Sp. II. = 40	Sp. I. = 100	Sp. I. = 150	Sp. I. = 200	Sp. I. = 300

Einige Bemerkungen sind ferner erforderlich über die Berechnung der Gleichungen zwischen *Li*-Rot und *Na*-Gelb, die, wie oben angeführt, von einer gröfseren Anzahl von Personen erhalten wurden. Um in allen Fällen möglichst gleichartiges Licht anzuwenden, wurde auch hier die Abschwächung des *Na*-Lichtes, welche für die Rotblinden erforderlich war, nicht ausschliefslich durch Spaltverengerung, sondern durch Einschaltung eines blauen Glases bewirkt. Da dieses das *Na*-Licht etwa auf 0,23 schwächte, so konnten die Grünblinden ohne dieses Glas und die Rotblinden mit demselben die Gleichungen im Durchschnitt mit ziemlich nahe gleichen Spaltweiten (ca. 200 für das Rot und 40 bis 55 für das Gelb) einstellen. Die Beachtung dieses Punktes ist für die Erzielung genauer Resultate von einiger Bedeutung, denn es ist zu berücksichtigen, dafs ein Licht, welches wir *Li*-Rot nennen und das mit Spaltweite 200 hergestellt wird, bereits ziemlich unrein ist. Beobachten wir das eine Mal mit kleinen, das andere Mal mit viel gröfseren Spaltweiten, so stellt sich das Helligkeitsverhältnis von *Li*-Rot zu *Na*-Gelb schon merklich anders heraus. — Im übrigen wurde bei diesen Versuchen so zu Werke gegangen, dafs, um das unbekannte Helligkeitsverhältnis der beiden Spektren zu eliminieren, einmal im Kollimator I Rot und in II Gelb, sodann umgekehrt eingestellt wurde. Bei beiden Anordnungen hatten die Beobachter je 5 Einstellungen auf genaue Gleichheit der Felder zu machen. Nehmen wir an, dafs die Helligkeit des Spektrums I. sich zu der des Spektrums II. wie α zu 1 verhält, so würden 10 Teile *Na*-Licht bei der einen Anordnung die Menge $\alpha\, Q$, bei der anderen aber $\frac{Q}{\alpha}$ vom roten *Li*-Licht gleich

gemacht werden, sofern Q diejenige Menge des *Li*-Lichtes ist, die 10 Teilen *Na*-Licht aus demselben Spektrum gleich erscheint. Diese letzteren Werte erhalten wir also, wenn Q_1 und Q_2 die eingestellten Mengen von *Li*-Licht sind, als das geometrische Mittel aus beiden $\sqrt{Q_1 Q_2}$. Dieser Modus der Berechnung ist eingehalten worden, was übrigens im Resultat von keiner sehr grofsen Bedeutung ist, da die Helligkeit der beiden Spektren nicht sehr erheblich differierte (sie verhielten sich meist etwa wie 4:5).

Um die Absorption des benutzten blauen Glases für *Na*-Licht (und zwar von der durch die Spaltweite 50 bedingten Unreinheit) zu ermitteln, benutzten wir eine Abschwächung durch Polarisation. Im Kollimator I. wurde eine Lichtmischung aus *Na*-Licht und Blau eingestellt, das Blau durch eine eingeschaltete Bichromatkammer ausgelöscht. Nunmehr konnte zunächst eine Reihe von Einstellungen auf Gleichheit mit *Na*-Gelb des Kollimator II. gemacht werden, welche einen Durchschnittswert s angeben. Sodann wurde das *Na*-Licht des Kollimator II. durch Vorschaltung des blauen Glases abgeschwächt und nachdem in Kollimator I. die Spaltweite auf jenen gefundenen Wert s eingestellt war, durch Nicoldrehung in Kollimator I. wiederum Gleichheit hergestellt und die erforderlichen Nicoldrehungen abgelesen; schliefslich wurde dann wieder nach Entfernung des blauen Glases die ursprüngliche Vergleichung wiederholt. So erhielten wir für die Helligkeit des *Na*-Lichtes in Kollimator II. mit und ohne blaues Glas zwei untereinander vergleichbare Bestimmungen mit sehr nahezu denselben Spaltweiten. Die angenommene Zahl ist das mittlere Ergebnis mehrfach wiederholter Bestimmungen, deren Genauigkeit das für unseren Zweck geforderte Mafs weit übertraf.

(Aus dem Physiologischen Institut zu Freiburg i. Br.)

Über den Einfluſs des Makulapigments auf Farbengleichungen.

Von

Dr. Breuer.

Bei der Bedeutung, welche die Lichtabsorption im Pigment des gelben Flecks für die Empfindungseffekte gemischter Lichter besitzt, erschien es nicht ohne Interesse, etwas Genaueres, auch quantitatives, durch direkte Beobachtung über jene Absorptionen zu erfahren. Um so mehr erschien dies erwünscht, als wir durch die messenden Versuche von Sachs[1] zwar erfahren haben, in welchem Verhältnis jene Pigmente die verschiedenen Lichtarten absorbieren, hierin aber, wie Hering[2] betont, doch nur eine qualitative Bestimmung des Pigments gegeben ist, da die Beobachtungen an ausgeschnittenen Netzhäuten vorgenommen wurden, auf die Stärke aller Absorptionen resp. die Menge des in vivo vorhandenen Pigments aber kein Rückschluſs gestattet ist.

Eine direkte Bestimmung der makularen Lichtabsorptionen wird möglich sein, wenn wir auf der Makula gültige Mischungsgleichungen mit extramakularen vergleichen können. Da es wünschenswert ist, für solche Gleichungen, die nicht für das Zentrum selbst, aber für dessen nahe Nachbarschaft gelten, eine kurze Bezeichnung zu haben, und da andererseits die Benen-

---

[1] Sachs, Über die spezifische Lichtabsorption des gelben Fleckes der Netzhaut. *Pflügers Arch.* L. S. 574.

[2] E. Hering, Über den Einfluſs der Macula lutea auf spektrale Farbengleichungen. *Pflügers Arch.* LIV. S. 281.

nungen extramakulare, exzentrische oder periphere Gleichungen meist für solche verwendet werden, die sich auf gröſsere Zentralabstände und somit auf Partien mit bereits herabgemindertem Farbensinn beziehen, so will ich die auf die nähere Nachbarschaft der Makula sich beziehenden parazentral nennen. Eine Ermittelung der makularen Absorption könnte also, wie gesagt, ausgehen von der Gegenüberstellung zentraler und parazentraler Gleichungen, vorausgesetzt allerdings, daſs die Natur der lichtempfindlichen Substanzen an beiden Stellen die gleiche ist. Die Grundlage eines derartigen Versuchs ist die Thatsache, daſs ein homogenes Licht durch die Absorption wohl quantitativ, aber nicht qualitativ verändert wird. Nehmen wir n, um das Prinzip an einem einfachen Beispiel zu erläutern, daſs ein homogenes Orange 600 $\mu\mu$ parazentral einem Gemisch von 1 Teil Rot (670,8 $\mu\mu$) und q_1 Grün (517) gleich erscheine, während makular, um Gleichheit mit demselben Orange zu erzielen, auf 1 Teil Rot q_2 Grün erforderlich wären, so dürfen wir schlieſsen, daſs die Absorption im makularen Pigment, wenn sie das Rot in dem (nicht bekannten) Verhältnis $1 : \alpha$ schwächt, das Grün auf den Bruchteil $\alpha \frac{q_1}{q_2}$ vermindert. Lautet die ganze Gleichung extramakular

$$1 \; R + q_1 \, Gr. = p_1 \; Or.$$

und makular

$$1 \; R + q_2 \, Gr. = p_2 \; Or.,$$

so wäre, die Schwächung des Rot $= \alpha$ gesetzt, diejenige des Grün $\frac{q_1}{q_2} \alpha$, die des Orange $= \frac{p_1}{p_2} \alpha$. Alle Bestimmungen sind, wie hieraus hervorgeht, nur relative. Da indessen, soweit man weiſs, das langwellige Licht im Makulapigment keine merkliche Absorption erfährt, überdies auch, selbst wenn es der Fall wäre, die beständige Mitführung dieses unbekannten Koeffizienten überflüssig wäre, so soll in Folgendem von der Voraussetzung ausgegangen werden, daſs $\alpha = 1$ sei. Wenn also gesagt wird, daſs das Licht 517 $\mu\mu$ durch die makulare Absorption auf 0,8 geschwächt wird, so bedeutet das streng genommen eine Schwächung auf 0,8 von jenem Bruchteile, auf den auch das am schwächsten absorbierte langwellige Licht vermindert

wird. — Eine Bestimmung der obigen Art liefert, wie man sieht, die relative Absorption nicht nur für das mit dem Rot gemischte Grün, sondern auch für das mit dem Gemisch verglichene homogene Licht. Die Erfahrung lehrt indessen, daſs diese letzteren Bestimmungen weniger zuverlässig sind, als die anderen. Die Genauigkeit dieser nämlich (der Grünabsorption in unserem obigen Beispiel) hängt von der Genauigkeit ab, mit der wir die Farben beider Felder gleich machen können, d. h. von unserer Unterschiedsempfindlichkeit gegen Differenzen des Farbentons. Dagegen richtet sich die Sicherheit der Bestimmung der Orange-Absorption nach der Unterschiedsempfindlichkeit gegenüber Intensitätsdifferenzen.

Da Versuche dieser Art bisher, soviel mir bekannt, nicht angestellt worden sind, so unternahm ich es gern auf Vorschlag von Herrn Prof. v. Kries, mich mit denselben zu beschäftigen. Es war dabei allerdings im voraus klar, daſs es nicht gelingen kann, die Stärke der Pigmentierung etwa des genaueren, wie sie vom Zentrum gegen die Peripherie abnimmt, zu verfolgen. Der Methode konnte vielmehr kaum eine weitere Aufgabe gestellt werden, als die Vergleichung zweier Stellen, von denen die eine möglichst zentral, die andere aber doch nur soweit exzentrisch zu wählen war, daſs eine hinreichende Genauigkeit für die Herstellung der Mischungsgleichungen noch erreicht werden konnte. Ich verfuhr (nach einer Reihe orientierender Vorversuche) so, daſs ich einerseits die Einstellungen mit einem Felde von nur 1 ° Durchmesser bei direkter Fixierung machte; für die parazentralen Einstellungen wurde so zu Werke gegangen, daſs dem kreisförmigen Felde ein Durchmesser von 3 ° gegeben wurde; darüber wurde im Gesichtsfeld ein Fixierzeichen derart angebracht, daſs dasselbe 3 ° über dem oberen Rande des Feldes erschien, das Feld somit von 3—6 ° Zentralabstand sich erstreckte. Eine Ungleichmäſsigkeit in dem Aussehen des Feldes konnte bei dieser letzteren Anordnung ebensowenig wie bei der ersteren bemerkt werden. Wie die auf solche Weise gewonnenen Ergebnisse mit Rücksicht auf die ganze Ausdehnung des gelben Fleckes etc. zu beurteilen sind, soll am Schluſs noch kurz erörtert werden.

Eine gewisse Schwierigkeit schien allerdings den Versuchen insofern entgegen zu stehen, als ja bekanntlich die Mischung zweier homogener Lichter in zahlreichen Fällen blasser, weniger gesättigt erscheint, als ein homogenes Licht irgend einer mitt-

leren Wellenlänge. Indessen zeigte sich, daſs dieser Übelstand bei passender Wahl der zu mischenden Lichter von äuſserst geringer Bedeutung ist, und es gelingt sogar, was für das einzuhaltende Verfahren von Wichtigkeit war, die relative Absorption auch kurzwelliger Lichter zu ermitteln, ohne daſs man das Verfahren durch Aneinanderfügung sehr vieler Stufen kompliziert. Das Licht von der Wellenlänge etwa = 517 $\mu\mu$ hat nämlich die Eigenschaft, mit äuſserstem Rot gemischt ein Gelb oder Orange zu liefern, welches hinter dem homogenen noch ungemein wenig an Sättigung zurückbleibt, ebenso aber auch mit kurzwelligem Blau (etwa 460 $\mu\mu$) ein Blaugrün, welches nur sehr wenig von dem homogenen Blaugrün unterschieden ist.[1] Hiernach empfahl sich für die Versuche der modus procedendi, daſs zunächst in einer Reihe von Bestimmungen die Schwächung des Grün (517) bestimmt wurde, wobei dieses mit Rot (670) zu mischen und das Gemisch verschiedenen homogenen Lichtern mittlerer Wellenlänge gleich zu machen war, sodann aber die Absorption des Blau relativ zum Grün in Versuchen ermittelt wurde, bei denen Gemische von Grün und Blau wiederum mit homogenen Lichtern dazwischen gelegener Wellenlängen zu vergleichen waren. Die ganze Absorption des Blau ergab sich dann einfach durch die Multiplikation beider Werte. Da es in erster Stelle wichtig erschien, diese stärksten Absorptionen kurzwelliger Lichter zu ermitteln, so war es erwünscht, durch nur zwei Bestimmungen, also noch einigermaſsen direkt, zu ihnen gelangen zu können. Der eben angegebene Weg wurde daher umsomehr eingehalten, als bei den beiden hier ins Spiel kommenden Vergleichungen die erwähnten Sättigungsdifferenzen so klein waren, daſs sie eine merkliche Störung des Versuchs nicht involvierten. Ich habe einige Male versucht, sie noch auszugleichen, durch Zusetzung kleiner Mengen unzerlegten weiſsen Lichtes zu dem homogenen, ohne aber einen Vorteil davon konstatieren zu können, und bin daher wieder davon abgekommen.

Es wäre schlieſslich hinsichtlich der Ausführung der Versuche noch hinzuzufügen, daſs in allen Fällen der Helmholtz'sche Farbenmischapparat benutzt wurde, über dessen Einrichtung und

---

[1] Für die Mischungen des Rot und Grün ist hierbei sehr wesentlich, daſs mit helladaptiertem Auge gearbeitet werde; sonst werden allerdings die Unterschiede erheblich wegen der beträchtlich gröſseren Stäbchenvalenz des Gemischs gegenüber dem homogenen Gelb.

Verwendungsweise auf die Abhandlung von v. Kries und Nagel (*Diese Zeitschrift* XII. S. 1) verwiesen werden kann. Stets wurde mit helladaptiertem Auge gearbeitet, und es wurden durchgängig sechs Einstellungen mit zentraler, sodann sechs mit parazentraler Beobachtung gemacht. Die sich hieraus ergebenden Mittelwerte sind den folgenden Angaben zu Grunde gelegt. Die Anbringung eines Fixierzeichens geschah gleichfalls in der a. a. O. S. 25 beschriebenen Weise. Natürlich muſste ferner, da im hellen Zimmer gearbeitet wurde, Sorge getragen werden, daſs nicht mit der Spiegelung des Fixierzeichens etwa noch gespiegeltes Licht dem Beobachtungsfelde sich beimischte; durch Aufstellung eines Hintergrundes von schwarzem Sammet hinter dem als Fixierzeichen dienenden Gasflämmchen war das leicht zu erreichen.

Im Folgenden sind nun zunächst die Ergebnisse einer Anzahl von Versuchen zusammengestellt, welche die Absorption des Grün betreffen, und bei welchen verschiedene homogene Lichter als Vergleichslichter benutzt wurden. Der erste Stab enthält die Wellenlänge des benutzten homogenen Lichtes, der zweite die sich ergebende zentrale Grün-Absorption (also den Wert $\frac{\left(\frac{\text{Grün}}{\text{Rot}}\right) \text{exz.}}{\left(\frac{\text{Grün}}{\text{Rot}}\right) \text{zentr.}}$, der dritte die sich berechnende Schwächung des homogenen Lichtes (also $\frac{\text{Rot zentr.}}{\text{Rot exz.}}$)

Tabelle I.

Homogenes Licht	Absorption des Grün 517	Absorption des homogenen Lichtes
620 $\mu\mu$	0,80	0,95
620 „	0,81	1,05
589 „	0,81	0,993
589 „	0,80	1,09
560 „	0,79	1,2
560 „	0,70	1,25
560 „	0,73	1,22

Man sieht, dafs bei Anwendung des homogenen Lichtes 560 $\mu\mu$ die Absorptionen etwas höher erscheinen. Die Differenzen sind zwar gering, aber da sie in allen Fällen wiederkehren, wohl kaum als Beobachtungsfehler zu deuten. Worin sie ihren Grund haben mögen, darüber können wir zur Zeit nur eine Vermutung aussprechen. Es ist nämlich bekannt, dafs in den Gleichungen der hier benutzten Art stets das homogene Licht eine kleinere Stäbchenvalenz besitzt als die Mischungen. Aus diesem Grunde dürfte bei der parazentralen Beobachtung die wohl niemals ganz zu beseitigende Funktion der Stäbchen dahin tendieren, das Gemisch blasser erscheinen zu lassen. Erfahrungsmäfsig aber verwechselt man in diesem Gebiete sehr leicht Differenzen der Sättigung mit solchen des Farbentons, und zwar so, dafs man das rote Licht für gesättigter hält. Je mehr also Sättigungsdifferenz Platz greift, um so mehr wird zu befürchten sein, dafs man das blassere Licht etwas zu rot, d. h. im Gemisch zu wenig grün nimmt. Dieser Unterschied, der wohl bei dem Licht 560 schon etwas mehr ins Gewicht fallen könnte, würde also dahin tendieren, die Grünabsorption zu hoch erscheinen zu lassen. Vermutlich aber dürfen wir hiernach als den korrektesten denjenigen Wert ansehen, bei welchem das homogene Licht 620 benutzt und somit nur eine sehr kleine Grünbeimischung erfordert wurde.

Im dritten Stabe der Tabelle sind die Absorptionswerte hinzugefügt, welche sich für die benutzten homogenen Vergleichslichter selbst ergaben. Da die Quantitäten des homogenen Lichts bei zentraler und exzentrischer Beobachtung dieselben waren, so berechnen sich diese als die Quotienten aus den in der zentralen und der exzentrischen Gleichung erforderlichen Rotmengen. Wie aber schon erwähnt, können diese Zahlen keinen Anspruch auf sehr grofse Genauigkeit machen. Bei den homogenen Lichtern von 620 und 589 $\mu\mu$ ergeben sie indessen ganz zutreffend, dafs eine merkliche Absorption nicht stattfindet, bei 560 $\mu\mu$ dagegen berechnet sich eine nicht bedeutende, aber doch in allen Versuchen wiederkehrende Absorption im verkehrten Sinne, d. h. es ist in der parazentralen Gleichung sogar etwas weniger Rot als in der zentralen genommen. Der Grund dieser Erscheinung dürfte wohl in demselben Umstand zu finden sein, der eben berührt wurde, nämlich in der gröfseren Stäbchenvalenz der Mischung, welche es

mit sich bringt, daſs parazentral die Gesamtmenge des Gemisches etwas zu gering eingestellt wird. Im ganzen möchte ich hiernach diejenigen Zahlen, welche bei Benutzung der langwelligen Vergleichslichter erhalten wurden (620 und 589 $\mu\mu$), für die zuverlässigeren halten.

Im ganzen durchaus ähnlich gestaltete sich der Versuch über die relative Absorption des Blau (460,8 $\mu\mu$). Die Bestimmungen wurden ausgeführt mit homogenen Lichtern von 510, 500 und 490 $\mu\mu$ und lieferten die nachstehend zusammengestellten Resultate.

Tabelle II.

Wellenlänge des homogenen Lichts	Absorption des Blau 460,8 $\mu\mu$ relativ zum Grün 517 $\mu\mu$	Absorption des homogenen Lichts relativ zum Grün
510	0,70	0,98
510	0,65	0,86
500	0,79	0,85
500	0,78	0,89
490	0,67	0,66
490	0,63	0,83

Wir erhalten hier somit für die Absorption des Blau relativ zum Grün Zahlen, die sich zwischen 0,63 und 0,79 bewegen. Der dritte Stab zeigt auch hinsichtlich des benutzten homogenen Vergleichslichts die mit abnehmender Wellenlänge stärker werdende Absorption; doch lassen die starken Schwankungen auch hier die verhältnismäſsig geringe Sicherheit dieses Verfahrens erkennen.

Die obigen Zahlen dürften, auch wenn man ihre Genauigkeit nicht zu hoch veranschlagt, genügen, um zu zeigen, daſs das Verfahren überhaupt ausführbar ist, und auch, um mindestens über die Gröſsenordnung der betreffenden Absorptionen eine gewisse Vorstellung zu geben. Berechnen wir im Mittel die relative Absorption des Grün auf 0,77, die des Blau im Verhältnis zu Grün nach Tabelle II auf 0,70, so würde sich für die relative Absorption des Blau der Wert $0,77 \cdot 0,70 = 0,54$

ergeben, d. h. die relative Schwächung des blauen Lichtes wäre etwa auf 0,54 zu veranschlagen. Es ist nicht ohne Interesse, darauf hinzuweisen, daſs diese Zahl sich nicht sehr weit von den Absorptionswerten entfernt, welche Sachs an den gelben Flecken herausgeschnittener Netzhäute gefunden hat. Diese Zahlen bewegen sich für das Licht 486 $\mu\mu$ zwischen 0,656 und 0,786. Im übrigen darf angeführt werden, daſs, nach Ausweis der zahlreichen im hiesigen physiologischen Institut ausgeführten Bestimmungen über Makula-Pigmentierungen, die meinige sich wohl als eine etwas unter dem Durchschnitt rangierende (z. B. ein wenig schwächer als die von Dr. Nagel) bezeichnen läſst, jedoch noch keineswegs zu den schwächsten gehört.

Die im Obigen zusammengestellten unmittelbaren Ergebnisse der Versuche lassen sich in einigen Beziehungen auf Grund nur qualitativer Beobachtungen ergänzen, wobei man sich z. T. auch auf Sachs' Beobachtungen an Netzhautpräparaten stützen darf. Wiewohl nämlich meine Messungen sich nur auf zwei Punkte des Spektrums erstrecken und es bei der beschränkten Genauigkeit der Bestimmungen auch kaum rätlich erschien, sie auf zwischenliegende Punkte auszudehnen, so können wir doch bemerken, daſs die Absorptionswerte durchgängig mit abnehmender Wellenlänge wachsen. Sachs hat dies gefunden, und ich muſs dem, soweit meine Beobachtungsweise darüber ein Urteil gestattet, zustimmen. Vergleicht man Mischungen aus 517 $\mu\mu$ und 490 $\mu\mu$ mit einem dazwischen liegenden homogenen Licht, oder Mischungen aus 490 und 460 mit einem homogenen Licht 480, stets sieht man, daſs, wenn die Gleichung zentral richtig eingestellt ist, bei exzentrischer Betrachtung das Gemisch zu blau, das homogene Licht relativ zu grünlich wird. In allen Fällen gewinnt also durch den Übergang zur Peripherie der brechbarere Bestandteil mehr als der weniger brechbare. Wenn nun auch in Bezug auf den genaueren Gang, der die Absorption als Funktion der Wellenlänge darstellenden Kurve Differenzen bestehen mögen, so dürfen wir es danach doch wohl als ausgeschlossen ansehen, daſs irgendwelche Lichtarten von zwischenliegenden Wellenlängen erheblich stärkere Absorptionen als das untersuchte Licht erfahren.

Im Hinblick auf die an ausgeschnittenen Netzhäuten ge-

machten Erfahrungen erschien es ferner von Interesse, zu prüfen, ob etwa ein Fehlen des Makulapigments in der Fovea selbst konstatiert werden könne. Es hätte sich dies dadurch verraten müssen, dafs bei Benutzung sehr kleiner Felder die zentral eingestellte Gleichung bei geringen Blickabweichungen im verkehrten Sinne, entsprechend einer zunehmenden Pigmentierung, unrichtig geworden wäre. Hiervon habe ich indessen trotz mannigfach variierter Versuche niemals etwas entdecken können, so wenig wie (nach mündlicher Mitteilung) Herr Prof. von Kries. Es ist danach wohl zu vermuten, dafs im lebenden Auge (wenigstens in den unsrigen) das Zentrum die höchstgradige Pigmentierung besitzt. Erscheint im Präparate die Fovea selbst ungefärbt, so mag das vielleicht an der hier vorzugsweise schnell auftretenden Zersetzung des Pigments liegen. Möglich bleibt freilich auch das Vorhandensein individueller Verschiedenheiten.

Geht man aber auch von der hiernach wohl wahrscheinlichsten Annahme aus, dafs die Pigmentierung in einem kleinen zentralen Bezirk ihren stärksten Grad erreicht und von da nach allen Seiten allmählich abnimmt, so wird es natürlich doch unmöglich sein, die ermittelten Zahlen als quantitativ genaue Absorptionswerte irgend einem bestimmten Teile zuzuschreiben, und wir werden auch nicht hoffen können, die als ideales Ziel zu stellende Aufgabe, eine Bestimmung der Absorptions- (oder Färbungs)werte als Funktion des Zentralabstandes, lösen zu können. Indessen wird es vielleicht im Hinblick auf sonstige physiologisch-optische Fragen auch weniger darauf ankommen, als auf gewisse Vergleiche, für welche die hier gewonnenen Zahlen doch vielleicht eine genügende Unterlage abgeben können. In vielen Fällen nämlich wird es sich nur darum handeln, einigermafsen überschlagen zu können, welchen Einflufs etwa die abnehmende Makulapigmentierung, beim Übergang von dem Zentrum selbst auf Nachbarteile, auf Farbengleichungen u. dergl. ausüben kann. Ein Beispiel hierfür ist die folgende Thatsache. Bekanntlich nimmt die Empfindlichkeit der Netzhaut in dunkeladaptiertem Zustande vom Zentrum gegen die Peripherie sehr erheblich zu, wobei es übrigens von Bedeutung ist, mit was für einer Lichtart geprüft wird. Ich habe über diesen Gegenstand eine Anzahl von Versuchen angestellt, über welche in einem anderen Zusammenhang berichtet werden wird.

Da die Steigerung der Empfindlichkeit vorzugsweise stark für kurzwelliges Licht bemerkbar ist, so kann sich hier in der That die Frage erheben, ob etwa die Unterempfindlichkeit des Zentrums ganz oder zum Teil auf Rechnung der Makulaabsorptionen zu setzen ist. In dieser Richtung nun ermöglichen Zahlen wie die obigen ganz wohl eine bestimmte Beurteilung. Denn wenn ich z. B. finde, dafs der Schwellenwert in 3^0 Abstand nur etwa $^1/_{20}$ des zentralen beträgt, so wird man sagen dürfen, dafs an dieser Steigerung die verminderte Makulaabsorption sicher nur einen ganz geringen Anteil haben kann, die Erscheinung aber in der Hauptsache auf andere Umstände zurückgeführt werden mufs.

Über den Einflufs, den das makulare Pigment in der Richtung besitzt, dafs durch die Verschiedenheiten seiner Stärke die zentralen Farbengleichungen individuelle Differenzen aufweisen, können natürlich meine Versuche keinen direkten Aufschlufs gewähren. Wenn indessen meine Resultate darauf hinweisen, dafs der Gesamtbetrag der Absorptionen kein so sehr gewaltiger zu sein scheint, so machen sie es doch wahrscheinlich, dafs auch die hierin begründeten Differenzen und Schwankungen keine sehr hohen Beträge erreichen werden.

Berichtigung.

In den Tabellen VI und VII meiner Arbeit „Über Farbensysteme“ (S. 277 und 278 dieses Bandes) sind durch ein Versehen die Überschriften des 2. und 3. Stabes („zu hell“ und „zu dunkel“) vertauscht worden. Ich bitte also über Stab 2 „zu dunkel“ und über Stab 3 „zu hell“ zu lesen. v. Kries.



Lith Anst. Julius Klinkhardt Leipzig







